

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Diplomová práce

2012

Petr Silber

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra kybernetiky a biomedicínského inženýrství

**Měřicí systém pro vyhodnocení účinnosti větrné
elektrárny na bázi virtuální instrumentace**
**Measurement System for Wind Turbine Effectiveness
Evaluation Based on Virtual Instrumentation**

Ostrava, 2012

Petr Silber

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Silber**

Studijní program: N2649 Elektrotechnika

Studijní obor: 2601T004 Měřicí a řídicí technika

Téma: Měřicí systém pro vyhodnocení účinnosti větrné elektrárny na bázi
virtuální instrumentace
Measurement System for Wind Turbine Effectiveness Evaluation Based
on Virtual Instrumentation

Zásady pro vypracování:

Pro zjištění účinnosti VTE počínaje mechanickým výkonem na hřídeli generátoru je potřeba dále analyzovat účinnost generátoru, usměrňovače a polovodičového měniče. Měnič je zařízení převádějící AC nebo DC napájecí síť na AC síť s nastavitelnou frekvencí (slouží obvykle k napájení motorů). Frekvence generátoru a výstupní frekvence měniče se u VTE velmi liší a je nutné navrhnout měřicí řetězec a následně zpracování signálu tak, aby byly poskytovány dostatečně přesné výsledky pro požadovaný rozsah napětí a frekvencí. Navíc je potřeba měřit mechanický výkon na hřídeli generátoru: měřením otáček a momentu prostřednictvím vhodných čidel. Předpokládá se realizace v laboratoři a následný reálný provoz na školní VTE.

1. Seznámení se s problematikou měření parametrů větrných elektráren.
2. Seznámení se s problematikou měření elektrických a mechanických výkonů.
3. Rešerše dostupné přístrojové techniky a rozbor funkce.
4. Návrh a vývoj SW aplikace měřicího systému.
5. Ověření funkčnosti aplikace a zhodnocení použité technologie.
6. Nedílnou součástí odevzdání diplomové práce je 3-4 stránkové shrnutí realizované problematiky (rozšířený abstrakt) v angličtině.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. *LabVIEW Fundamentals*. Austin: National Instruments, 2007. 165 s.
2. Firemní dokumentace NI Developer Zone.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Petr Bilík, Ph.D.**

Datum zadání: 19.11.2010

Datum odevzdání: 04.05.2012



doc. Ing. Jiří Kozíorek, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

***Souhlasím se zveřejněním této bakalářské/diplomové práce dle požadavků čl.
26, odst. 9 Studijního a zkušebního řádu pro studium v
bakalářských/magisterských programech VŠB-TU Ostrava.***

V Ostravě 4.5. 2012

A handwritten signature in black ink, consisting of stylized, cursive letters.

Poděkování

Chtěl bych touto cestou velmi poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Doc. ing. Petru Bilíkovi, Ph.D. za cenné rady, konzultace a připomínky spojené s vypracováním mého úkolu.

Abstrakt

Tato diplomová práce se zabývá problematikou měření účinnosti jednotlivých bloků větrné elektrárny. Analyzuje funkci konkrétního typu větrné elektrárny pro potřeby takového měření. Na základě teoretického rozboru dané problematiky, navrhuje a realizuje specializovaný, měřicí přístroj za využití metod a prostředků virtuální instrumentace. Praktická část práce dokumentuje postup tvorby hardwarové části měřicího systému, včetně vlastní kalibrace. V rámci kalibrace vyhodnocuje přesnost budoucího měřicího systému. Pro získání hardware, následuje tvorba vhodného měřicího software, umožňujícího dlouhodobý, plynulý chod a automatickou archivaci měřených dat. Součástí práce je také zhodnocení funkčnosti použitého řešení, a návrh následného směřování vývoje tohoto zařízení.

Klíčová slova

účinnost, výkon, větrná elektrárna, virtuální instrumentace, LabView, měření, sběr dat

Abstract

This diploma thesis looks into problem of the efficiency measurement of particular components of wind power plant. Function of specific wind power plant is analyzed within the thesis for needs of such a measurement. On the basis of theoretical analysis of the problem given, suggests and implements specialized measurement device, while using tools and methods of virtual instrumentation. The practical part of thesis documents the procedure of the future measurement device hardware, including its calibration. The accuracy of the future measurement device is evaluated during the stage of calibration. The Acquisition of measurement device hardware is followed by creation of suitable measurement software, which allows long-term and fluent operation and automatic storage of acquired measurement data. The final part of this thesis, evaluates the used form of the given problem solution and gives a suggestion for future heading of this project.

Keywords

Efficiency, Power, Wind power plant, Virtual instrumentation, LabView, measurement, data acquisition

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	amplituda [V]
DAQ	Data Acquisition – sběr dat
DC	Direct Current – stejnosměrný proud
DFT	Discrete Fourier Transform
f	frekvence [Hz]
f_s	vzorkovací frekvence [Hz]
Δf	rozdíl frekvencí
FFT	Fast Fourier Transform
$i_{(t)}$	okamžitá hodnota proudu [A]
I / O	input/output – vstupně/výstupní
P	střední výkon signálu [W]
SCM	Signal Conditioning Module – modul pro úpravu signálu
T	perioda [s]
t	čas [s]
T_s	perioda vzorkování [s]
T_w	časové okno
$u_{(t)}$	okamžité napětí [V]
VTE	větrná elektrárna
η	účinnost
φ	fáze

Seznam použitých cizích slov

alias – klam

antialiasing – odstraňující klam

discrete – diskrétní

data acquisition – sběr dat

device – zařízení

direct current – stejnosměrný proud

fast - rychlý

input – vstup

output – výstup

mean – střední

sample – vzorek

sample rate – vzorkovací frekvence

signal conditioning module – modul pro úpravu signálu

transform – transformace

time windows – časové okno

interchannel delay – mezikanálová prodleva

OBSAH

ÚVOD	1
1 ROZBOR PROBLEMATIKY FUNKCE VĚTRNÉ ELEKTRÁRNY A MĚŘENÍ ÚČINNOSTI.....	2
1.1 VĚTRNÁ ELEKTRÁRNA	2
1.2 MĚŘENÍ ÚČINNOSTI.....	4
1.3 DIGITÁLNÍ MĚŘENÍ.....	7
2 PŘEHLED DOSTUPNÉ PŘÍSTROJOVÉ TECHNIKY	8
3 NÁVRH A VÝVOJ MĚŘÍCIHO SYSTÉMU	10
3.1 SBĚR POŽADAVKŮ	11
3.2 NÁVRH HARDWARE MĚŘÍCIHO SYSTÉMU	13
3.3 NÁVRH APLIKACE PRO MĚŘENÍ VÝKONŮ A VYHODNOCENÍ ÚČINNOSTI.....	16
3.4 NÁVRH PREZENTACE ZÍSKANÝCH DAT	19
4 PRAKTICKÁ REALIZACE MĚŘÍCIHO SYSTÉMU	20
4.1 HARDWARE MĚŘÍCIHO SYSTÉMU.....	20
4.1.1 Rozbor kalibrace SCM modulů	21
4.1.2 Kalibrace offsetu SCM modulů	22
4.1.3 Kalibrace SCM modulů ve frekvenční oblasti	23
4.1.4 Analýza získaných kalibračních dat	27
4.2 SOFTWARE MĚŘÍCIHO SYSTÉMU	35
4.2.1 Ořezání vzorkovaného signálu na celé periody.....	36
4.2.2 Měření signálů o dvou různých frekvencích v jednom časovém okně	37
4.2.3 Měření signálu s proměnnou frekvencí	38
4.2.4 Interpolace kalibračních dat	39
4.2.5 Doplnění kalibračních dat pro aktuální frekvenční krok.....	40
4.2.6 Výpočet výkonu ve frekvenční oblasti a aplikace kalibračních konstant	41
4.2.7 Ukládání měřených dat do souboru	42
4.2.8 Grafické uživatelské rozhraní.....	43
5 ZAPOJENÍ MĚŘÍCIHO SYSTÉMU.....	44
6 ZÁVĚR	45
7 POUŽITÁ LITERATURA.....	0
8 INTERNETOVÉ ODKAZY.....	0
9 SEZNAM PŘÍLOH.....	1

ÚVOD

Účinnost je charakteristická vlastnost prakticky každého zařízení, které koná nějakou práci. Měření účinnosti a její následné vztažení k provozním podmínkám je zásadní pro optimalizaci provozu tohoto zařízení.

Cílem této práce je komplexní návrh a tvorba specializovaného měřicího přístroje, určeného pro měření účinnosti větrné elektrárny založeného na bázi virtuální instrumentace.

Práci lze rozdělit na teoretickou a praktickou část, kde teoretická část vysvětluje pojem virtuální instrumentace, přibližuje fungování větrné elektrárny, rozebírá obecně problematiku měření a navrhuje různé postupy při zjišťování účinnosti VTE, včetně průzkumu trhu, ohledně dostupnosti přístrojové techniky pro žádané měření a zhodnocení možností jejich využití pro řešení daného problému.

Praktická část se zabývá tvorbou konkrétního měřicího přístroje od základního sběru požadavků pro jeho funkci, přes hardwarový návrh, následně jeho praktickou realizaci, kalibraci výsledného produktu a vývoj softwaru konečného přístroje. Práci zakončuje zhodnocení použitého řešení.

1 Rozbor problematiky funkce větrné elektrárny a měření účinnosti

1.1 Větrná elektrárna

Elektrárna obecně, je zařízení sloužící k výrobě elektrické energie. Říká se sice výrobě elektrické energie, avšak přesnější označení by bylo přeměně jiného druhu energie, právě na energii elektrickou. V dnešní době se velice rozšiřují fotovoltaické elektrárny, které využívají fotovoltaického jevu k přeměně solární energie na energii elektrickou. I přes tento takzvaný „solární boom“, pochází stále drtivá většina vyrobené elektrické energie z elektráren využívajících Faradayův zákon elektromagnetické indukce známý již z první poloviny 19. století a popisuje vznik elektrického napětí v uzavřeném elektrickém obvodu v závislosti na změnách okolního magnetického pole. Příkladem praktického využitím tohoto poznatku je alternátor, který slouží k přeměně mechanické energie rotačního pohybu na energii elektrickou. Tato rotační energie je z pravidla získána za pomoci turbíny přeměnou z kinetické energie pohybující se kapaliny či plynu. U elektráren větrných a vodních je již z názvu zřejmé, že pro svou funkci využívají přirozeného proudění vzduchu v atmosféře, či vody v řekách. U elektráren tepelných a jaderných sice nejde opět o nic jiného, neboť využívají proudění páry vzniklé ohřevem vody teplem uvolněným při spalování fosilního paliva či štěpné reakci.

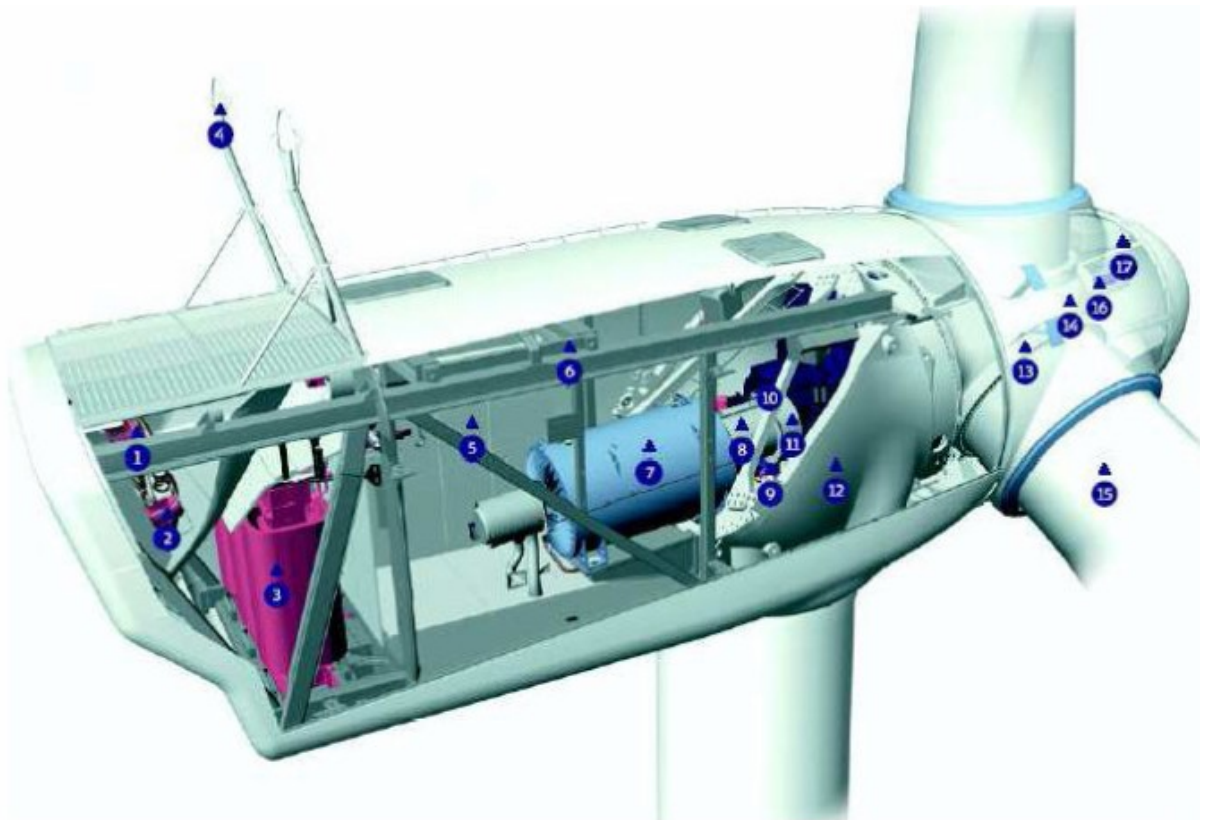
Větrná elektrárna, jak již bylo popsáno výše, využívá proudění vzduchu (větru), které je způsobeno rozdíly atmosférického tlaku, jako zdroj kinetické energie k roztáčení turbíny a následně také alternátoru.

Z tohoto vyplývají největší výhody a také nevýhody větrných elektráren. Když pomineme emise vznikající při výrobě větrné elektrárny jako takové, tato elektrárna dále po celou dobu své životnosti vyrábí elektrickou energii bez jakýchkoliv emisí škodlivých látek. Tento zdroj energie je prakticky nevyčerpatelný, neboť vzduch proudí v závislosti na změnách atmosférického tlaku, které vznikají primárně zapříčiňuje rozdílného ohřívání zemského povrchu v čase ať už z důvodu otáčení kolem vlastní osy či obíhání kolem slunce po své oběžné dráze. Větrné elektrárny také v porovnání s elektrárnami tepelnými představují drobné decentralizované zdroje energie, které lze umístit blíže ke koncovým spotřebitelům, čímž se snižují ztráty na vedení.

Oproti těmto výhodám stojí největší problém větrných elektráren, vítr, který není ani v nejmenším ochoten respektovat energetickou potřebu lidstva a je do velké míry nepředvídatelný. Elektrickou energii lze jen velmi obtížně skladovat a větrná elektrárna ji ze své podstaty produkuje pouze v závislosti rychlosti větru. Taková elektrárna potom jen po minimální dobu dosahuje, nebo se alespoň blíží svému instalovanému výkonu. Dále tento problém s sebou přináší nutnost potřeby tento značně nestálý zdroj energie zálohovat jiným, který je schopen při výpadku jej okamžitě nahradit.

Standardní větrná elektrárna se skládá z turbíny, která slouží k převodu kinetické energie větru na mechanickou rotační energii. Tato je dále transformována pomocí generátoru

na energii elektrickou. Takto získaná elektrická energie má však velice proměnlivé parametry a je dále ji potřeba převést na standardizované hodnoty síťového napětí. K tomuto převodu slouží další část, kterou je měnič napětí. Toto je pouze popis základních částí větrné elektrárny potřebných pro její chod. Moderní větrné elektrárny jsou o mnoho složitější, jak lze vidět na obrázku č.1.[3]



Popis částí větrné elektrárny:

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1) Olejový chladič | 10) Převodovka |
| 2) Chladič vody pro generátor | 11) Mechanická spojka |
| 3) Transformátor | 12) Rám stroje |
| 4) Ultrazvukový snímač větru | 13) Ložisko listů rotoru |
| 5) Ovládací panel s WMP měničem | 14) Hlava rotoru |
| 6) Servisní jeřáb | 15) List vrtule |
| 7) Generátor | 16) Válec pro nastavení úhlu sklonu listů |
| 8) Kompozitní spojka | 17) Regulátor nastavení úhlu sklonu |
| 9) Natáčení gondoly | |

Obr.1 Moderní větrná elektrárna

1.2 Měření účinnosti

Účinnost z pohledu fyziky je veličina, která při konání práce udává poměr mezi výkonem a příkonem stroje. Obecně lze říci, příkon je vždy větší než výsledný výkon stroje. V ideálním případě by se mohl rovnat jedné, avšak prakticky u každého stroje se vyskytují při práci energetické ztráty, jako například velmi časté tepelné ztráty kdy dochází k mimo požadovaného výkonu práce také k zahřívání stroje, ať už z důvodu tření, či elektrického odporu. Účinnost vyšší než 1 není fyzikálně možná, stroj nemůže vykonat více práce, než pro kterou je mu dodána energie, v tomto případě bychom popřeli základní fyzikální zákon, zákon o zachování energie a získali takzvané perpetuum mobile. Pozor, u některých strojů se lze dočíst o účinnosti udávané výrobcem větší než 1 (větší než 100%). Typickým příkladem jsou kondenzační kotle a tepelná čerpadla, u kterých ale ovšem není takto vysoká účinnost zapříčiněna popřením fyzikálních zákonů, nýbrž metodikou výpočtu.

Pro výpočet účinnosti lze použít následující vztah kdy P_1 je příkon stroje a P_2 je jeho výkon.

$$\eta = \frac{P_1}{P_2} \quad (1)$$

Případně lze účinnost uvažovat pouze jako poměr energie soustavě dodané a soustavou odevzdané

$$\eta = \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

Pokud máme v sérii zapojeno více strojů se svou vlastní účinností, pak celkovou účinnost soustavy vypočteme jako součin těchto jednotlivých účinností.

$$\eta = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \eta_4 \cdot \eta_5 \dots \quad (3)$$

Jak je vidět, pro výpočet účinnosti je potřeba znát jak příkon, tak výkon. Výkon je obecně definován jako práce W vykonaná za jednotku času t

$$P = \frac{W}{t} \quad (4)$$

Z výše uvedených vztahů je patrné, že pro potřeby zjištění musíme znát nejprve výkony daných spotřebičů, respektive jimi konanou práci v čase. Práce je definována jako energie potřebná k posunu tělesa o určitou vzdálenost.

$$W = F \cdot s \quad (5)$$

U větrné elektrárny lze z pohledu druhu působící síly hovořit o dvou druzích práce, práci mechanické a práci elektrické. Respektive mechanickém a elektrickém výkonu.

V první řadě se setkáváme s výkonem vzdušného proudu, který roztáčí turbínu. Tento proud vzduchu se opírá o lopatky turbíny, čímž jí předává část své kinetické energie.

$$E_K = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \quad (6)$$

Množství této předané kinetické energie za jednotku času je potom rovna námi hledanému výkonu.

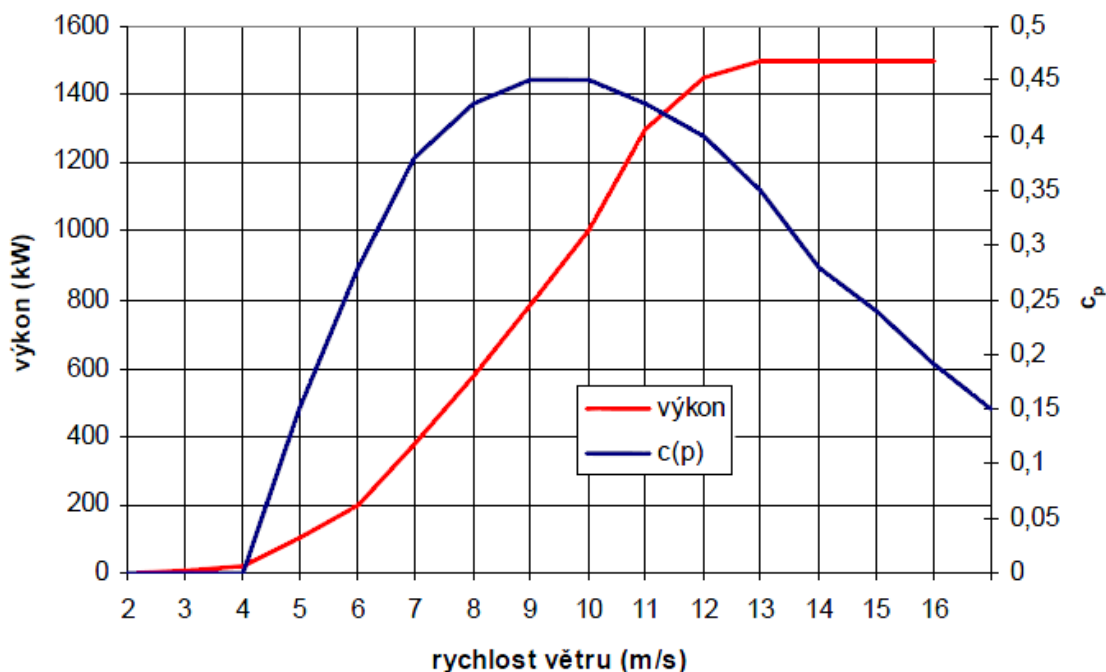
$$P = \frac{E_K}{t} \quad (7)$$

Takto postavený vztah ovšem předpokládá úplnou přeměnu kinetické energie větru na energii otáčející turbínou. Respektive k zastavení vzdušného proudění. K tomuto pochopitelně nedojde, neboť tato nedojde ani k úplné přeměně této kinetické energie. Míra jaké množství této energie se přemění je závislá na mnoha faktorech jako například tvar lopatek rotoru. Tento fakt popsal v první polovině 20. století německý fyzik Albert Betz, který odvodil, že na větrné turbíně lze dosáhnout přeměny kinetické energie maximálně z 59%.

Reálně se tedy pro výpočet výkonu větrné turbíny používá vztah

$$P = \frac{1}{8} \cdot \rho \cdot \pi \cdot v^3 \cdot D^2 \cdot c_p \quad (8)$$

Kde ρ je hustota vzduchu, v je rychlost větru, D průměr rotoru a c_p je součinitel výkonnosti, udávající maximální část energie kterou je schopna turbína využít. Dle odvození pana Betze může tento součinitel dosáhnout maximální hodnoty 0,59. V praxi ovšem tento koeficient bývá ještě menší a navíc závislý na rychlosti větru. Pro představu je na obrázku č. 2 uvedena výkonová křivka turbíny REpower MD 70.[3]



Obr.2 Výkonová křivka a součinitel výkonnosti větrné elektrárny

Pro výpočet mechanického výkonu rotačního systému, lze využít točivého momentu, který popisuje velikost síly působící v určité vzdálenosti od osy otáčení a ve směru tečny kružnice se středem v ose otáčení. Takový výkon potom získáme z následujícího vztahu, kdy M je točivý moment a ω je úhlová rychlost udávaná v radiánech za sekundu

$$P_{mech} = M\omega \quad (9)$$

Elektrický výkon je opět definován jako elektrická práce vykonaná za určitý čas. Elektrická práce je rovná energii potřebné pro přenesení náboje mezi místy s různým elektrickým potenciálem, nebo jinak řečeno elektrickým napětím.

$$P = U \cdot I \quad (10)$$

Tento vztah je ovšem vhodný pouze pro stejnosměrné obvody, respektive obvody kde se napětí a proud v čase nemění. U střídavých obvodů je třeba uvažovat s periodickými změnami proudu a napětí. V tomto případě lze výše uvedený vztah v principu využít pouze pro výpočet okamžitého výkonu, z hodnot okamžitého proudu a okamžitého napětí.

$$p = u \cdot i \quad (11)$$

Ovšem takto vypočtená, samostatně stojící hodnota okamžitého výkonu o ničem nevypovídá. Pokud ovšem víme, že proud s napětím mají periodický průběh, lze definovat střední hodnotu výkonu za jednu periodu. Takovýto výkon potom bude roven integrálu okamžitých výkonů na jedné periodě.

$$P_{el} = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (12)$$

Z těchto poznatků lze vyvodit závěr, že pro měření účinnosti je třeba nejprve získat jednotlivé výkony, které se budou dále porovnávat. Pro zjištění mechanického výkonu se musí změřit točivý moment a otáčky. Pro zjištění elektrického výkonu je potřeba nejprve měřit proud a napětí.

Předcházející vztahy platí pro výpočet elektrického výkonu v časové oblasti. Ovšem výkon lze vypočítat také v oblasti frekvenční a to využitím Parsevalova teoremu, který říká, že celkový výkon je roven součtu druhých mocnin amplitud jednotlivých frekvenčních složek.

1.3 Digitální měření

Všechny výše uvedené vztahy platí pro spojité veličiny, avšak veškerá digitální technika ze své podstaty umí pracovat pouze s diskrétními. Proto pokud chceme v tomto konkrétním případě měřit elektrické napětí, proud a z nich za pomoci výpočetní techniky počítat střední výkon, v průběhu měření dojdeme k navzorkování těchto signálů.

Vzorkování je v podstatě převod spojitěho analogového signálu na sérii diskrétních vzorků, které jsou od sebe časově vzdálené vždy o čas vzorkovací periody, periodickým měřením hodnoty tohoto signálu. Kvalita vzorkování je přímo úměrná velikosti vzorkovací frekvence. Čím rychleji bude vzorkováno, tím více se bude vzorkovaný signál podobat signálu původnímu.

Dle Nyquistova teorému musí být vzorkovací frekvence alespoň dvojnásobná oproti frekvenci vzorkovaného signálu, pro správnou reprezentaci frekvence vzorkovaného signálu. Respektive, frekvence vzorkovaného signálu nesmí být větší než polovina vzorkovací frekvence a proto zavádí pojem Nyquistova frekvence která je rovna právě polovině vzorkovací frekvence. Z tohoto vyplývá, že při vzorkování 50Hz signálu, musíme alespoň pro správné zachování frekvence, vzorkovat s frekvencí minimálně 100Hz.

Takovéto vzorkování, ale stačí pouze pro zjištění frekvence signálu. Pokud chceme daný signál jakkoli dále analyzovat, ať už zobrazit tvar, či třeba jen počítat charakteristické hodnoty jako amplitudu nebo střední hodnotu, musí být vzorkovací frekvence oproti frekvenci vzorkovaného signálu podstatně větší. Pro správnou reprezentaci tvaru vzorkovaného signálu se uvádí, že vzorkovací frekvence musí být alespoň pěti až desetinásobná.

Při pomalém vzorkování nastává problém, který se nazývá aliasing. Signály nad Nyquistovou frekvencí se potom projeví jako alias signály. Nejjednodušší způsoby jak se vyvarovat tomuto problému je zvýšit vzorkovací frekvenci, či použít dolnoproputný filtr. Takové navýšení vzorkovací frekvence, aby s jistotou zabránilo aliasingu, často nebývá možné a proto je třeba počítat se zapojením dolnoproputného filtru, tzv. antialiasing filtru.

Ve chvíli kdy už nepracujeme se signálem spojitým, nýbrž diskrétním, musíme také upravit vztahy uvedené výše pro spojitě signály. Takto upravený vztah pro výpočet elektrického výkonu vypadá následovně

$$P_{el} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u[n] \cdot i[n] \quad (13)$$

Podstata korektního použití tohoto vztahu pro vzorkované periodické signály leží v počítání se správným počtem vzorků. Přesněji řečeno, veškeré výpočty musí vždy probíhat na celistvém počtu period. Pokud by toto nebylo dodrženo, necelá část periody by znehodnotila celé měření. V průběhu vzorkování lze tomuto problému za určitých podmínek předcházet.

Při znalosti kmitočtu, respektive periody signálu a pochopitelně také vzorkovací frekvence, lze snadno odvodit počet vzorků, případně jejichž celočíselné násobky je třeba změřit pro získání celistvých period vzorkovaného signálu. Pokud tyto informace nemáme, je potřeba tuto problematiku ošetřit softwarově.

2 Přehled dostupné přístrojové techniky

Na trhu se vyskytuje řada přístrojů různých výrobců použitelných pro aplikaci vyhodnocující účinnost. Obecně se jedná o analyzátory elektrické energie. Patří mezi ně produktová řada Norma od společnosti Fluke. Produkty pro analýzu elektrické energie od výrobce Voltech, či analyzátory vyráběné, v tomto odvětví tradičním výrobcem, společností Yokogawa. Z domácích zástupců uvedme na příklad Elcom.



Obr.3 Fluke, Norma serie

Všechny tyto společnosti vyrábí velmi kvalitní zařízení, která by bylo možno použít pro řešení zadaného problému, avšak pro jeho specifikaci by takováto řešení nebylo možné považovat za efektivní. Tato konkrétní aplikace totiž vyžaduje, ideálně současně měření, celkově šestnácti analogových vstupů o různých kmitočtech. Tyto analogové veličiny je potřeba vyhodnocovat až po frekvenci 9kHz. Některé přístroje z potencionálního výběru vyřazuje už jen tato šířka frekvenčního pásma. Převážnou většinu zbylých potom diskvalifikuje potřebný počet měřených kanálů. Standardně jsou tyto přístroje vybaveny pouze šesti kanály (tři páry, proud a napětí), což sice běžně vyhovuje pro analýzu elektrické energie třífázové rozvodné sítě, ale pro požadovanou aplikaci, která by vyhodnocovala účinnost jak celkovou, tak jednotlivých bloků větrné elektrárny je to nedostatečné.

Nasnadě jsou dvě možná řešení tohoto problému, přičemž první je spíše nekorektním obcházením problému nežli jeho řešením. Tímto je myšleno postupné přepojování analyzátoru mezi jednotlivými bloky větrné elektrárny a následné vyhodnocení měřených hodnot. Toto „řešení“ by ovšem zásadně omezilo funkčnost, konkrétně možnosti automatického fungování a hlavně, takovéto řešení by již nebylo možno považovat za korektní, neboť všechny měřené veličiny jsou v čase proměnlivé a i když se u větrné elektrárny nepředpokládají jejich skokové změny, v určitých případech by mohlo dojít k zásadnímu zanesení nepřesnosti do metodicky chybného způsobu měření.[10][11][12]

Korektním řešením by bylo využití většího počtu těchto analyzátorů. V tomto případě by bylo potřeba zajistit jejich synchronizaci a externí vyhodnocení naměřených výsledků. Toto řešení by tudíž vedlo k zásadnímu navýšení konečné ceny měřicího zařízení a růstu jeho složitosti, neboť by se skládal z několika analyzátorů připojených k PC, které by zajišťovalo synchronizaci a výsledné zhodnocení měřených výsledků.

Tento letmý průzkum poukazuje na oprávněnost návrhu vlastního měřicího přístroje na bázi virtuální instrumentace. Takovýto přístroj totiž nejen, že splňuje veškeré požadavky, neboť je navržen přesně podle nich, ale také poskytuje mnohé výhody, jakými jsou například jeho snadná rozšiřitelnost či znovupoužití víceúčelového hardware pro jinou aplikaci v budoucnosti.

3 Návrh a vývoj měřicího systému

Vytvářený měřicí systém je určen k měření účinnosti konkrétní větrné elektrárny, stojící v areálu VŠB-TU Ostrava u budovy L, tzv. HARD. Tuto elektrárnu má ve správě Katedra elektroenergetiky, konkrétně potom pan Doc. Ing. Stanislav Mišák, Ph.D. Co se týče vlastních parametrů, jak měřících rozsahů, tak pracovních podmínek, bude měřicí systém optimalizován právě pro toto zařízení.



Obr.4 Větrná elektrárna

Životní cyklus takového měřicího systému lze rozdělit do pěti fází. První základní fází je takzvaný sběr požadavků, v průběhu kterého, se ujasní veškeré požadavky na vyvíjený systém. Jako druhá fáze následuje návrh systému, který se týká převážně návrhu hardwarového provedení a nástin softwarového řešení. Třetí fází je následná implementace navrhnutého řešení, čímž je myšlena výroba a sestavení hardwaru a vývoj kompletního software a dokumentace. Následující čtvrtou fází je logicky testování měřicího systému vytvořeného v předchozích dvou fázích a jeho případné opravy. Poslední pátou fází v životním cyklu takového měřicího systému je jeho následná funkce a údržba po celou dobu jeho životnosti.

3.1 Sběr požadavků

V první řadě je potřeba vyjasnit základní požadavky a specifikace navrhovaného systému.

Po osobní konzultaci s Doc. Stanislavem Mišákem a prohlídce větrné elektrárny, včetně jejího rozvaděče byl vytvořen základní seznam požadavků.

Větrná elektrárna jako taková má instalovaný výkon 12kW a jak už bylo zmíněno se nachází v areálu VŠB-TU Ostrava vedle budovy L. Její rozvaděč je umístěn v laboratoři L04 uvnitř této budovy.

Pro úplné vyhodnocení účinnosti větrné elektrárny, je zapotřebí začít už měřením výkonu vzdušného proudu který zapříčiňuje otáčení turbíny. Toto by ovšem vyžadovalo další komplikovaná zařízení pro měření rychlosti větru, jeho hustoty a znalost charakteristiky větrné turbíny v podobě průběhu jejího součinitele výkonnosti.

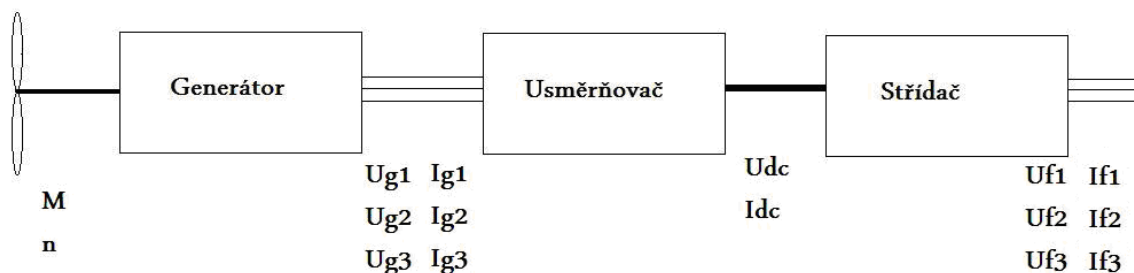
Sledovaná větrná elektrárna má třílistou turbínu, za kterou je potřeba měřit rychlost jejího otáčení, respektive počet otáček za jednotku času a její točivý moment.

Tato turbína pak roztáčí rotor asynchronního generátoru, který vytváří točivé magnetické pole, jehož důsledkem je indukce elektrického napětí na cívkách statoru. Výstupem jsou tři fáze napětí střídavého charakteru. Z tohoto vyplývá, že pro zjištění výkonu za tímto generátorem je potřeba měřit tři střídavá napětí a tři proudy, které ze své podstaty budou dosahovat obdobných velikostí a frekvencí, avšak budou vzájemně fázově posunuty.

Z generátoru je elektrická energie vedena do napěťového usměrňovače. Tento blok usměrňuje střídavé elektrické napětí na stejnosměrné. Jeho výstupem je stejnosměrné napětí a proud.

Stejnoseměrné napětí získané za usměrňovačem je dále přivedeno na střídač, který jej opět převede na třífázové střídavé napětí avšak už s parametry standardního síťového napětí.

Obr. č. 5 zachycuje blokové schéma větrné elektrárny, respektive jejích částí zásadních pro návrh měřicího systému včetně naznačení veličin, které je nutné měřit pro vyhodnocení účinnosti.



Obr.5 Blokové schéma větrné elektrárny

Z blokového schématu je patrné že pro vypočtení celkové účinnosti soustavy je v konečném důsledku potřeba měřit celkem 16 veličin s časovým průběhem. Z toho dvě veličiny jsou neelektrického charakteru. Pro měření točivého momentu a otáček turbíny jsou již na větrné elektrárně senzory namontovány a budou pro následující práci využity. Jejich výstupy

jsou společně se všemi proudy a napětími potřebnými pro vyhodnocení celkové účinnosti svedeny do rozvaděče pozorované elektrárny umístěném v laboratoři L04.

Takováto koncentrace veškerých potřebných signálů v jedné rozvodné skříní přímo vybízí k umístění měřicího zařízení v její blízkosti. Umístěním měřicího zařízení do laboratorního prostředí se stálou pokojovou teplotou a vlhkostí, se snadným přístupem k napájecímu napětí z běžné rozvodné sítě velmi zjednodušuje problematiku návrhu samotného měřicího zařízení, neboť není potřeba řešit veškeré problémy s tímto spojené.

Dle technické specifikace jednotlivých bloků větrné elektrárny zobrazených ve schématu (obr. č.5) poskytnutém Doc. Stanislavem Mišákem mohou proudy a napětí vystupující z jednotlivých bloků dosahovat následujících parametrů:

Napětí a proudy přímo za generátorem, U_g a I_g mohou teoreticky dosáhnout maximálních hodnot $U_g=300V$ a $I_g = 16A$. Toto napětí je obecně střídavé a pohybuje se v rozmezí frekvencí od 2Hz až po 35Hz.

Napětí a proud přímo za usměrňovačem, U_{DC} a I_{DC} mohou teoreticky dosáhnout maximálních hodnot $U_{DC}=500V$ a $I_{DC} = 23A$. Toto napětí by teoreticky mělo být čistě stejnosměrné.

Napětí přímo za střídačem, U_f je transformováno na standardní síťové napětí, které se pohybuje v okolí hodnoty $U_f=230V$ a nemělo by přesáhnout efektivní hodnotu 240V. Toto napětí je střídáno na normovanou frekvenci 50Hz. Proudů za střídačem se tudíž pohybují v závislosti na momentálním výkonu větrné elektrárny a to v rozmezí od 0 (elektrárna nevyrábí žádný proud), až po hodnoty $I_g = 16A$.

Při prvním pohledu na blokové schéma na obrázku č. 5 by mohlo leckoho napadnout, že je zbytečné napětí nejprve usměrňovat a následně opět za pomoci střídače rozkmitat, ale jak je vidět z předešlé analýzy požadavků, z generátoru vzhledem k proměnlivé rychlosti větru vystupuje také napětí o proměnné frekvenci. Přímá úprava napětí s proměnlivou frekvencí na napětí o normované frekvenci 50Hz je nejsnáze realizovatelná právě tímto způsobem. V tomto případě se signál nejprve musí usměrnit aby pak stálý stejnosměrný signál mohl být rozkmitán na požadovanou frekvenci.

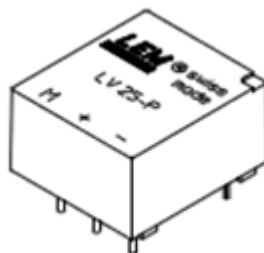
Dále je třeba uvažovat s možným výskytem vyšších harmonických, se kterými je třeba taktéž počítat. Tyto harmonické se běžně vyhodnocují až po frekvenci 9kHz.

3.2 Návrh hardware měřicího systému

Ze zadání vyplývá, že měřicí systém bude založen na bázi virtuální instrumentace. I přes toto relativně konkrétní zadání je k dispozici stále poměrně široká škála možných hardwarových platforem, na kterých lze systém založit. Vzhledem k výše uvedené skutečnosti, že veškeré měřené signály jsou svedeny do jedné rozvodné skříně, umístěné v laboratoři se stálými klimatickými podmínkami, lze celý měřicí systém potom řešit bez nejmenších problémů na základě platformy běžného PC se standardním operačním systémem Windows, pouze rozšířeném o vhodné zařízení pro sběr dat (Data Acquisition Device). Takováto zařízení jsou běžně dostupná jak v provedení pro interní PCI sběrnici, tak pro univerzální sériovou sběrnici USB.

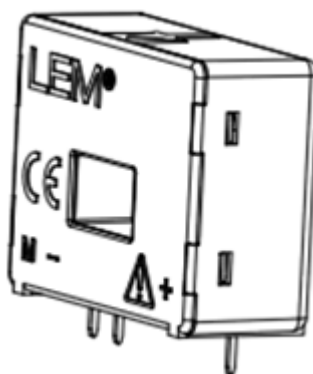
Rozsahy proudů a napětí, které je pro vyhodnocení účinnosti potřeba měřit jsou mimo rozsahy běžných zařízení pro sběr dat (měřících karet). Z tohoto důvodu je potřeba převést tyto signály na úroveň, které bude možno snadno měřit. Pro tyto účely slouží takzvané proudové a napěťové převodníky. Jedním z největších a světově nejuznávanějších výrobců těchto převodníků, je švýcarská společnost LEM.

Pro převod napětí byl vybrán převodník vyráběný společností LEM, LV25-P SP2 dimenzovaný pro napětí do 500V a maximální frekvence 10kHz



Obr.6 LV25-P SP2

Pro převod proudu byl zvolen převodník rovněž od společnosti LEM, LA55-P. Tento převodník slouží k převodu proudu v rozsahu až po 70A a pracuje ve frekvenčním pásmu od DC až po 200kHz. [13]



Obr.7 LA55-P

Tyto zvolené převodníky jsou vhodné pro použití při měření všech požadovaných napětí a proudů a tudíž bude potřeba sedmi kusů od každého z obou typů. Pro svou funkci využívají Hallova jevu, jehož vedlejším efektem je galvanické oddělení. Tyto převodníky vyžadují externí zdroj napájení a je vhodné je ihned doplnit o další části pro úpravu signálu jako je dolnoproustný antialiasing filtr. Vzhledem k požadavkům zadavatele práce, Doc. Mišáka, na profesionální zpracování byly vypracovány předběžné cenové kalkulace pro případy výroby modulů pro úpravu signálů vlastními silami a specializovanou firmou Po dohodě s Doc. Mišákem, byly převodníky svěřeny firmě Elcom a.s. k profesionálnímu zapouzdření a doplnění o zmiňovaný antialiasing filtr. Po dodání, bude potřeba pro tyto zapouzdřené převodníky doplnění o AA filtr dodat (odměřit) frekvenční charakteristiku za použití referenčního zdroje, pro ověření jejich vlastností, neboť nelze předpokládat, že budou všechny zcela identické.

Pro vývoj aplikace zpracování dat bude využito softwarové platformy LabVIEW 2010. Z tohoto vyplývají jednak výhody ale také omezení pro další návrh. Použitím tohoto vývojového prostředí omezujeme výběr měřících karet pouze na ty, které jsou tímto prostředím podporovány, jinak řečeno, na karty téhož výrobce.

Jako zařízení pro sběr dat (DAQ Device) byla získána dvojice karet NI USB-6216. Karta disponuje 16 analogovými vstupy, dvěma analogovými výstupy o šestnáctibitovém rozlišení. Dále má 32 digitálních vstupů/výstupů a dva 32 bitové čítače. Karta má pro 16 kanálů single-ended, či 8 kanálů v diferenčním zapojení sdílenou vzorkovací frekvenci 400kS/s.[9]



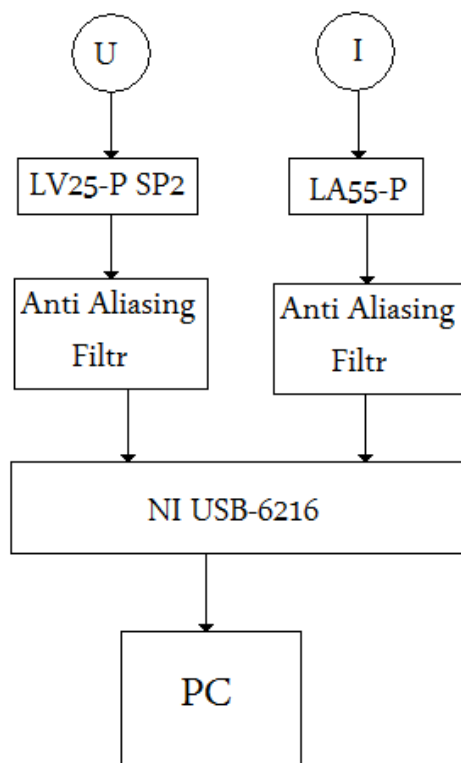
Obr.8 NI USB-6216

Obečně využití virtuální instrumentace v kombinaci s výběrem karet s USB rozhraním, poskytuje velkou výhodu pro vývoj software. Vzhledem k podstatě virtuální instrumentace, programová část funguje standardně pod běžným operačním systémem jediné specializované zařízení, zařízení pro sběr dat je připojeno přes USB. To znamená, že vyvíjenou aplikaci lze velice snadno přenášet mezi různými PC. Toto umožňuje vývojáři po celou dobu vývoje a testování pracovat na svém osobním notebooku a při finálním uvedení do provozu během chvíle aplikaci zprovoznit na cílovém PC. Jediné podmínky pro tuto operaci jsou volné USB porty a instalace Labview na cílovém PC. V případě problémů s použitím USB sběrnice v místech s výskytem elektrického rušení, je možno přejít na použití interních karet do standardní sběrnice PCI.

3.3 Návrh aplikace pro měření výkonů a vyhodnocení účinnosti

Z úvodní analýzy problematiky vyhodnocování účinnosti vyplývá, že pro její korektní vyvození je potřeba znát výkony jednotlivých bloků větrné elektrárny. Vzhledem k tomu, že jednotlivé výkony se mění v průběhu času v závislosti na síle větru, který pohání turbínu větrné elektrárny, musíme znát tyto výkony pro daný časový okamžik. Jinak řečeno, musíme měřit všechny tyto výkony souběžně. Při paralelním měření více kanálů, se nevyhneme drobným časovým posuvům zapříčiněným přepínáním karty mezi jednotlivými kanály. Respektive tomuto by bylo možné se vyhnout, ale znamenalo by to použít zvláštní kartu pro měření každé jednotlivé veličiny. Jednotlivé časové posuny jsou v podstatě statickou charakteristikou každé měřicí karty odvozené od její maximální vzorkovací frekvence a nazývané interchannel delay, volně přeloženo jako prodleva mezi kanály. Tuto hodnotu lze vypočítat jako převrácenou hodnotu maximální vzorkovací frekvence, vyčíst z dokumentace příslušné karty, nebo případně zjistit jako vlastnost karty po jejím zapojení přímo v LabView. Pro výše uvedené měřicí karty je hodnota interchannel delay rovna $2,5\mu\text{s}$. Při měření dvou periodických signálů se tato prodleva projeví fázovým posunem. Vzhledem k její velikosti je zjevné, že pro nižší frekvence měřeného signálu je téměř zanedbatelná, ale vzhledem k plánu vyhodnocovat frekvence až do 9kHz, je potřeba počítat také s tímto vlivem.

Na obrázku č. 9 je vidět základní blokové schéma pro měření právě jednoho libovolného elektrického výkonu. Toto schéma je pro všechny elektrické výkony společné. V konečném důsledku tedy bude v programu probíhat celkově 7 těchto bloků paralelně.



Obr.9 Blokové schéma měřicího řetězce pro 1 výkon

Napětí, i proud jsou spojité veličiny. Jako spojité postupují měřicím řetězcem přes příslušné převodníky, které upraví jejich rozsah tak, aby byl stravitelný pro měřicí kartu.

Antialiasing filtr se postará o odfiltrování vysokých frekvencí, které by z kapacitních důvodů nebylo možno korektně navzorkovat.

O toto vzorkování se postará měřicí karta NI USB-6216, která tímto převede spojité napětí a proud na diskretní. V této diskretní podobě putují záznamy do PC jako řady po sobě jdoucích hodnot se vzájemnou časovou vzdáleností $\frac{1}{f_s}$, kde f_s je vzorkovací frekvence.

Právě až v PC dochází k těm nejrozsáhlejším úpravám. Jak již bylo zmíněno v úvodu, veškeré výpočty musí probíhat pouze na celistvých periodách. Vzhledem k proměnlivé frekvenci a tudíž i délce period, nelze dopředu dopočítat kolik vzorků při dané vzorkovací frekvenci případně právě na jednu periodu. Z tohoto důvodu je potřeba pro měření použít delší časové okno, celkový průběh signálu zanalyzovat a vyříznout z něj co největší počet celých period. Nejjednodušším a nejspolehlivějším způsobem je za pomoci vyhledání průchodů nulou v naměřené sérii vzorků. Takto získáme nové ohraničení naměřeného okna, které už bude obsahovat pouze celé periody.

Takovéto ořezání se provede vždy pouze pro jeden ze série třífázových napětí/proudu, jelikož pro ně lze předpokládat totožné frekvence a tudíž také shodné délky jejich period. U dalších již tedy není potřeba vyhledávat průchody nulou, ale pouze vyříznout stejné časové okno.

U těchto dvojic totiž pro výpočet výkonu potřebujeme vždy konkrétní páry vzorků sejmuté ve stejný okamžik. Výsledný výkon je potom dle vztahu 13 roven sumě vzájemných násobků vzorků proudu a napětí, podělené jejich celkovým počtem.

Toto byl popis výpočtu výkonu v časové oblasti, ale celkový výkon lze rovněž řešit v oblasti frekvenční. I pro toto řešení stále platí blokové schéma, uvedené na obrázku č. 9. K jediným změnám dochází u finálního výpočtu v PC. S výpočtem v časové oblasti se shoduje také v metodě pro vyhledání celistvých period. Dále je ovšem potřeba převést už ořezané okna vzorkovaného napětí a proudu z časové, do frekvenční oblasti. K tomuto převodu lze využít algoritmu rychlé fourierovy transformace FFT (Fast Fourier Transform). Celkový výkon je potom roven součtu výkonů příslušících jednotlivým frekvencím.

Dále s měřením výkonu souvisí vhodná volba časového okna. V měřeném okně by mělo být alespoň deset celých period signálu a zároveň by nemělo být příliš dlouhé, aby v průběhu měření nedošlo k zásadním změnám měřených veličin. V případě měření za střídačem je to poměrně jednoduché. Za střídačem je stála frekvence o velikosti 50Hz, což znamená, že pokud chceme v rámci časového okna měřením postihnout 10 period, dostačuje k tomuto okno o délce 0,2s. Za takto krátkou dobu se vzhledem k setrvačnosti rotoru větrné elektrárny žádné výrazné změny projevit nemůžou.

Komplikace ovšem přichází při měření za asynchronním generátorem, neboť v tomto místě má kmitočet napětí velmi proměnlivý charakter a dosahuje v lepším případě až k 35Hz, ale při slabém větru padá až ke 2Hz. Při nižších frekvencích je elektrárna vypínána. Při takto velkém rozptylu, se objevuje také velký rozptyl u hodnot pro ideální časové okno a to v rozmezí od cca 0,3s až po 5s. 5s už je ale ovšem poměrně dlouhá doba v průběhu které může dojít k zásadní změně měřené veličiny.

Nejjednodušší by pochopitelně bylo, kdyby šlo nastavit jedno časové okno napevno, což by ovšem vzhledem k výše uvedenému nebylo vhodné řešení. Z tohoto důvodu je potřeba algoritmus doplnit o část, která při každém měřicím cyklu počítá také aktuální frekvenci signálu přímo za generátorem a v závislosti na ní upravuje časové okno z výše uvedeného rozsahu pro následující měření.

Z takto vybraných sérií vzorků už lze spočítat jednotlivé výkony, potažmo účinnosti konkrétních částí větrné elektrárny.

Vzhledem k potřebám měření a hardwarovým možnostem měřicích karet, které jsou pro tento projekt k dispozici, se jeví jako vhodné řešení použít jednu kartu pro měření na části s proměnnou frekvencí, což znamená pro měření výkonu za generátorem a mechanického výkonu za rotorem. Druhou kartu pak bude možno využít pro měření signálu s konstantní 50Hz frekvencí a stejnosměrného signálu. Toto umožní vhodné přizpůsobování časového okna a rovněž rovnoměrně rozloží zátěž měření na obě karty.

3.4 Návrh prezentace získaných dat

U měření tohoto typu se předpokládá, že bude probíhat nepřetržitě, dlouhodobě a bez stálie přítomnosti obsluhy. Z tohoto vyplývá, že kromě samozřejmého okamžitého zobrazování měřených hodnot, pro okamžitou kontrolu funkce zařízení, je třeba tyto hodnoty také pravidelně archivovat. K tomuto slouží část algoritmu, která zajišťuje periodické ukládání měřených dat do souboru. Ukládat se budou pouze informace o výkonech a z nich vyvozených účinnostech. Z pochopitelných, kapacitních důvodů se neukládají informace o konkrétních měřeních (celé série vzorků).

Pro ukládání dat do souboru je možno použít souborového formátu TDMS. Tento formát se nabízí neboť, je přímo určen pro ukládání měřených dat. Přímo součástí potřebnou pro plné využití tohoto formátu je ovšem také software pro správu a prezentaci takto uchovaných dat od National Instruments NI DIAdem. Bohužel nelze očekávat, že při následném zpracování bude tento software k dispozici. Při volbě způsobu ukládání je potřeba předpokládat přítomnost pouze standardních kancelářských programů. Pro tyto potřeby se jeví jako nejvýhodnější využít běžný .txt dokument. Tento formát lze otevřít na jakémkoliv PC bez potřeby specializovaných programů. Navíc při vhodném naformátování ukládaných dat, je lze snadno exportovat například do poměrně běžně dostupného tabulkového procesoru MS Excel.

4 Praktická realizace měřicího systému

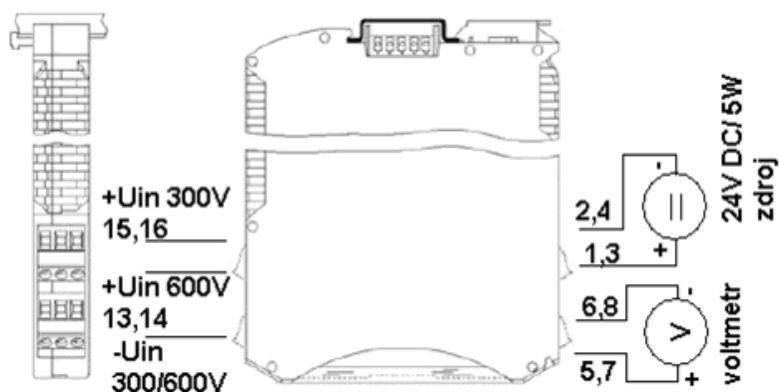
4.1 Hardware měřicího systému

Výše uvedené převodníky byly po odborném zapouzdření dodány pod produktovým označením SCM101 pro napěťové a SCM111 pro proudové převodníky. Oba typy jsou mají galvanicky odděleny vstupy a výstupy a jsou uzavřeny v pouzdech o rozměrech 114,5 x 99 x 22mm umožňujícím uchycení na 35mm DIN lištu a vyžadují 24V DC napájení.



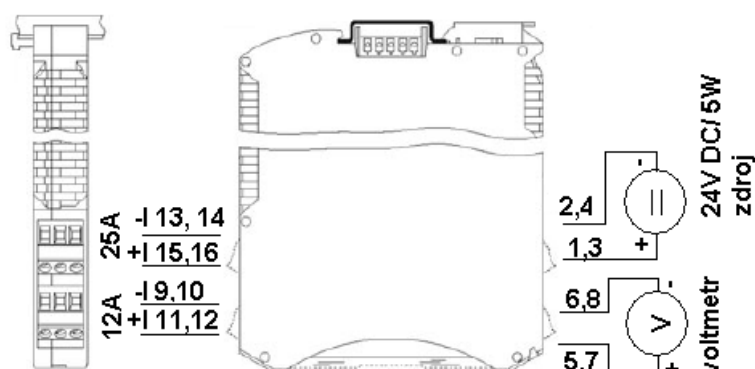
Obr.10 Napěťový a proudový převodní modul

Modul napěťového převodníku je konstruován se dvěma vstupními rozsahy a to ± 600 a ± 300 V. Pro tyto rozsahy platí převodní konstanty 100V/1V, respektive 50V/1V.



Obr.11 schéma zapojení napěťového převodníku

Modul proudového převodníku byl rovněž vyhotoven se dvěma vstupními rozsahy tentokrát ± 25 a ± 12 . Převodní konstanty odpovídající daným rozsahům jsou $4\text{A}/1\text{V}$ a $2\text{A}/1\text{V}$.



Obr.12 schéma zapojení proudového převodníku

4.1.1 Rozbor kalibrace SCM modulů

Ačkoliv se převodníky LEM vyznačují velmi dobrou linearitou, pro přesné měření s jejich využitím je potřeba provést zejména jejich kalibraci frekvenční závislosti. Jde v podstatě o měření na referenčním zdroji a porovnání vstupních proudů a napětí, které jsou garantovány přesností zdroje. Jako jejich podíl následně získáme převodní konstanty. Lze předpokládat, že tyto konstanty se budou v blízkosti hodnot udaných v technické dokumentaci dodané k modulům. Tato kalibrace bude provedena na kalibrátoru Fluke v prostorách společnosti Elcom a.s. Tento generátor umožňuje generování signálu o napětí až 300V a proudu 20A. Z frekvenčního pohledu umí generovat stejnosměrný signál a střídavé signály o kmitočtech od 20Hz do 60Hz. Generování vyšších frekvencí lze realizovat za pomoci vyšších harmonických a to až do výše 6kHz jakožto stou harmonickou 60Hz signálu. Tyto vyšší harmonické pochopitelně mohou dosahovat pouze nižších amplitud.

Pro kalibraci je potřeba vhodně zvolit krok mezi jednotlivými měřeními frekvencemi. Nemá smysl otrocky proměřovat celé frekvenční spektrum a je proto vhodné brát v potaz charakter měřeného signálu. Z jeho analýzy vyplývá, že nejpodstatnější pro měření je frekvenční rozsah od 0Hz právě do 60Hz.

Vzhledem k potřebám následného měření a možnostem kalibrátoru jsou voleny tyto základní frekvence pro kalibraci: 0Hz, a od 20Hz do 60Hz po kroku 5Hz.

Při těchto frekvencích bude kalibrace probíhat při jednotném proudu 20A a napětí 300V

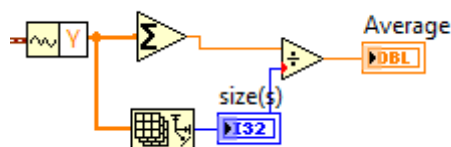
Vyšší frekvence je potřeba reprezentovat jako vyšší harmonické 50Hz signálu a kalibrace proběhne na 3, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 80 a 100 harmonické. A dále ještě 100. harmonická 60Hz signálu. Tyto harmonické odpovídají frekvencím 150Hz, 350Hz, 500Hz, 750Hz, 1kHz, 1,5kHz, 2kHz, 2,5kHz, 3kHz, 4kHz, 5kHz a 6kHz. Amplituda vyšších harmonických bude činit 5% amplitudy základní harmonické.

Dále je potřeba vhodně zvolit délku časového okna měření, respektive vzorkovací frekvenci a počet měřených vzorků. Je vhodné volit časové okno s ohledem na frekvenci signálu aby se v daném časovém okně vyskytoval celistvý počet period měřeného signálu při všech měřených frekvencích. Vzhledem k tomu, že cílem kalibrace je získat frekvenční amplitudovou a fázovou charakteristiku, je také třeba zohlednit, že na volbě časového okna závisí krok mezi jednotlivými prvky frekvenčních spekter. Při volbě nevhodného časového okna by se mohlo například stát, že frekvenční spektrum nebude obsahovat sledovanou frekvenci.

Z těchto ohledů se jako ideální jeví časové okno $T_w = 0,2s$, které splňuje všechny požadované podmínky a tímto určí krok frekvenčního spektra $\Delta f = 5Hz$.

4.1.2 Kalibrace offsetu SCM modulů

Ještě před začátkem měření na kalibrátoru je nutné zjistit offset jednotlivých modulů. Offset v podstatě hodnota napětí na výstupu modulů při nulové hodnotě na jejich vstupu. Toto měření lze snadno provést bez potřeby jakýchkoliv zdrojů signálu. Hodnotu offsetu na výstupu získáme po propojení vstupních svorek modulu. Hodnota offsetu neustále mírně kolísá a tudíž je pro budoucí potřeby nutné zjistit její průměrnou hodnotu v čase.



Obr.13 Měření offsetu

	offset [V]
SCM_U1	-0,007543
SCM_U2	0,023251
SCM_U3	0,017610
SCM_U4	-0,011275
SCM_U5	0,000067
SCM_U6	0,018387
SCM_U7	-0,009898
SCM_I1	0,012035
SCM_I2	0,016688
SCM_I3	0,005274
SCM_I4	-0,000865
SCM_I5	0,001877
SCM_I6	0,002672
SCM_I7	-0,003895

Tabulka č.1 Hodnoty offsetu

I přesto, že naměřené hodnoty offsetu jsou relativně velmi malé, pro korektnost měření je s nimi potřeba počítat. Dále je už tohoto jednoduchého měření patrné, že mezi jednotlivými převodníky jsou opravdu rozdíly.

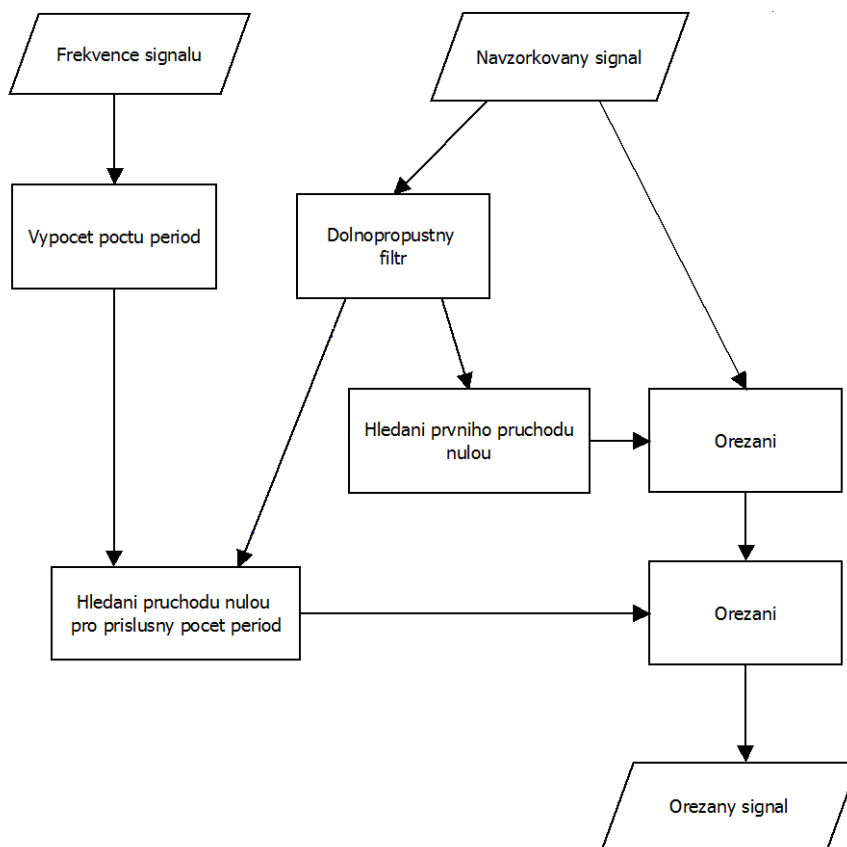
4.1.3 Kalibrace SCM modulů ve frekvenční oblasti

Vzhledem k tomu, že tuto část je potřeba provést na kalibrátoru v soukromé firmě, je nutné brát ohledy na jejich potřeby, respektive snažit se o přizpůsobení této části programu pro co nejrychlejší provedení. Při sériovém propojení vstupů proudových převodníků a paralelním propojení napěťových, lze kalibrovat všechny převodníky v jeden okamžik. Vzhledem ke znalosti účelu a budoucnosti tohoto projektu, je vhodné už v tuto chvíli svázat jednotlivé SCM moduly s konkrétními vstupy určitých měřících karet. Výpis předpokládaného přiřazení jednotlivých vstupů karet a jim příslušejících SCM modulů je zaznamenán v tabulce č.2. Kalibrovány jsou pouze rozsahy převodníků, jejichž využití se předpokládá, tedy 600V pro napěťový a 25A pro proudový.

Převodník	Měřicí karta	Vstup karty
SCM_U1	DAQ_DEVICE_1	AI1
SCM_U2	DAQ_DEVICE_1	AI2
SCM_U3	DAQ_DEVICE_1	AI3
SCM_U4	DAQ_DEVICE_2	AI1
SCM_U5	DAQ_DEVICE_2	AI2
SCM_U6	DAQ_DEVICE_2	AI3
SCM_U7	DAQ_DEVICE_2	AI4
SCM_I1	DAQ_DEVICE_1	AI9
SCM_I2	DAQ_DEVICE_1	AI10
SCM_I3	DAQ_DEVICE_1	AI11
SCM_I4	DAQ_DEVICE_2	AI9
SCM_I5	DAQ_DEVICE_2	AI10
SCM_I6	DAQ_DEVICE_2	AI11
SCM_I7	DAQ_DEVICE_2	AI12

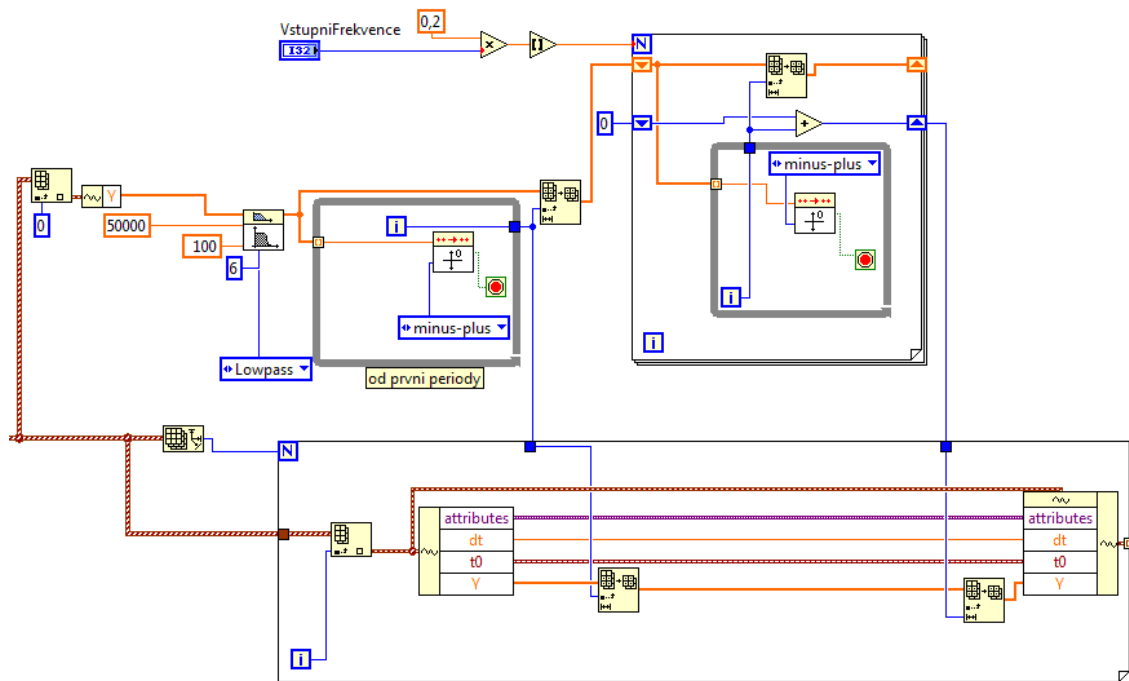
Tabulka č.2 Seznam propojení karet a převodníků

Jak bylo zmíněno již výše, k jedné měřicí kartě je potřeba zkalibrovat 6 SCM modulů a ke druhé 8. Z toho vyplývá, že i program pro kalibraci se v některých ohledech musí lišit pro první a druhou kartu. Přestože pro zjištění kalibračních konstant je potřeba, jak bylo uvedeno výše, časové okno $T_w = 0,2s$, bude základní kalibrační měření probíhat na delším časovém úseku, kvůli zajištění jistoty přítomnosti násobku celistvých period. Z tohoto časového okna pak bude vyříznuto právě ono potřebné $T_w = 0,2s$. Měření pro příslušné frekvence budou probíhat vždy jednorázově. Způsob takového ořezání je zobrazen na blokovém schématu na obr. č. 13.



Obr.13 Blokové schéma - ořezání na celé periody

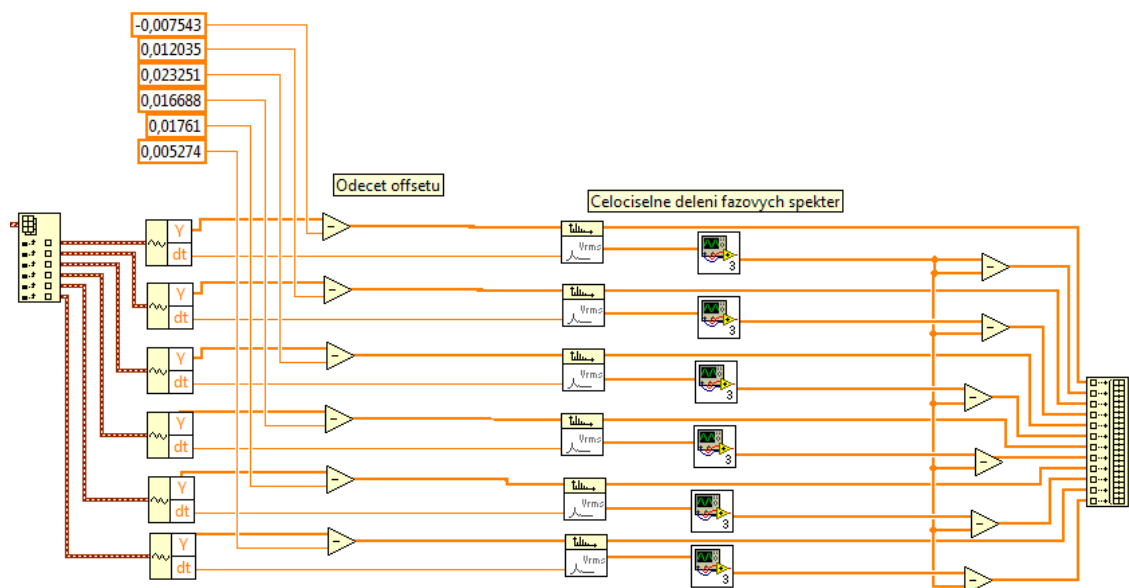
Jak je ze schématu patrné, do tohoto bloku vstupuje vzorkovaný signál a informace o frekvenci měřeného signálu. Tato metoda funguje na principu vyhledávání průchodu signálu nulovou hodnotou. Vzorkovaný signál je potřeba nejprve přefiltrovat aby nedošlo k detekci vícenásobného průchodu nulou způsobeného šumem. Dále je v sérii vzorku signálu vyhledán první průchod nulou. Ze vstupní informace o měřené frekvenci je spočteny příslušný počet period pro zvolené časové okno $T_w = 0,2s$. Na základě tohoto výpočtu je potom odříznut požadovaný zbytek signálu.



Obr.14 ořezání na celé periody

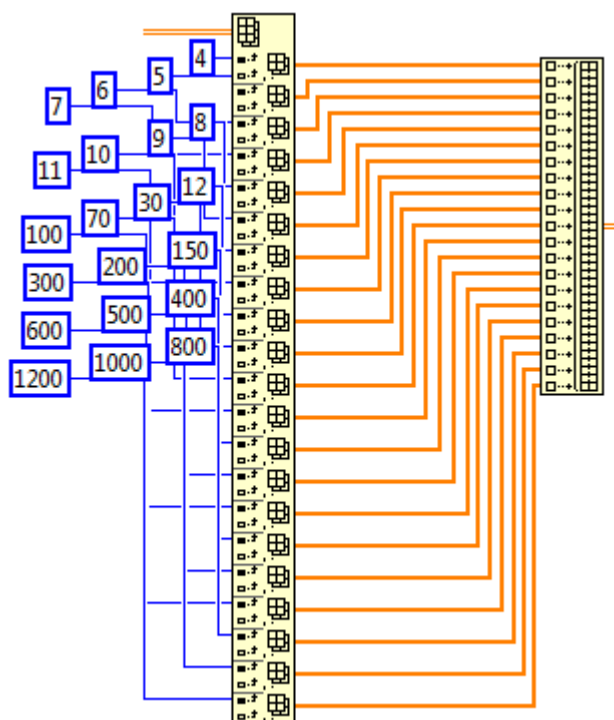
Na obrázku č. 14 lze vidět praktickou realizaci, takového ořezání v LabView. Na základě zjištěných průchodu nulou prvního signálu, jsou posléze oříznuty všechny měřené signály ve stejných indexech, tudíž ve stejném časovém okně. Tato část kódu je sdílená jak při kalibraci šesti převodníků na první kartě, tak při kalibraci zbývajících osmi na kartě druhé. Z kódu lze mimo jiné vyčíst, že filtrace slouží pouze pro vyhlazení signálu v okolí průchodu nulou, ale pro následné výpočty je použit signál nezkreslený filtrem.

Takto ořezaný signál již lze použít pro výpočet kalibračních konstant. Nejprve je nutné od každého signálu odečíst příslušnou hodnotu offsetu. Poté přichází na řadu FFT (Fast Fourier Transform), neboli rychlá fourierova transformace, jejíž výstupem jsou pro každý signál dvě řady koeficientů. Jedna pro amplitudové frekvenční spektrum a druhá pro fázové frekvenční spektrum. Toto jsou již hodnoty, jejichž získání je právě cílem této, části kalibrace, avšak je potřeba je ještě dále upravit. Fázová spektra je vhodné pro lepší orientaci vztáhnout k jednomu referenčnímu signálu, nejprve je ovšem, vzhledem k periodickému charakteru fáze nutné, provést jejich celočíselné dělení. Volba referenčního signálu připadá logicky na první měřený signál. K tomuto pak budou vztaženy všechny následující. Na obrázku č.15 zobrazen kód takovéto úpravy, již se zakomponovanými hodnotami offsetu pro kalibraci tří napěťových a tří proudových SCM modulů na první kartě. Pro zbývajících osm modulů na druhé kartě vypadá kód velmi podobně, jen je pochopitelně rozšířen pro zpracování správného počtu signálů.



Obr.15 Úprava kalibračních dat

Získaná frekvenční spektra, jak fázová tak amplitudová, jsou požadovaném frekvenčním rozsahu a s krokem 5 Hz, ale proti potřebám obsahují všechny koeficienty. Pro získání koeficientů náležících příslušným frekvencím, musí následovat indexace žádaných prvků z celého pole hodnot, jak je vidět na ukázce kódu na obrázku č. 16. Indexy hledaných prvků jsou rovny podílu jejich frekvenční příslušnosti a kroku mezi jednotlivými prvky spektra.



Obr.16 Indexace požadovaných prvků

Vzhledem k tomu, že na použitém kalibrátoru lze generovat vždy jen jeden signál a případně se třemi vyššími harmonickými, musí se pro kompletní kalibraci vykonat celkově 14 měření. Tyto měření se budou dále zpracovávat, neboť z každého měření je podstatná pouze jedna hodnota z amplitudového a jedna hodnota z fázového spektra při měření frekvencí od 20Hz až po 60Hz. Při měření frekvencí nad 60Hz s využitím vyšších harmonických, lze použít tři hodnoty z každého spektra. Následné zpracování dat, kdy se vyberou z každého měření právě sledované hodnoty proběhne v prostředí MS Excel. Výstup měření je tedy formátován s ohledem na snadné vložení do předpřipraveného .xls souboru.

4.1.4 Analýza získaných kalibračních dat

Kompletní výstupy těchto měření jsou zaznamenány ve dvou .xls souborech které jsou součástí příloh této práce. V následující tabulce š.3, je pouze výtah z kalibračního měření jednoho páru napěťového a proudového modulu pro 50Hz signál při 300V a 20A

	AmpSpec Napeti1	PhaseSpec Napeti1	AmpSpec Proud1	PhaseSpec Proud1
20Hz	6,30E-05	0,00E+00	5,92E-05	-5,59E+00
25Hz	4,96E-05	0,00E+00	1,01E-04	-2,34E+00
30Hz	8,61E-05	0,00E+00	1,76E-04	-1,86E+01
35Hz	1,23E-04	0,00E+00	1,98E-04	6,32E-01
40Hz	1,73E-04	0,00E+00	2,90E-04	-2,86E+00
45Hz	4,05E-04	0,00E+00	6,85E-04	2,40E-02
50Hz	3,00E+00	0,00E+00	5,01E+00	7,97E-02
55Hz	4,58E-04	0,00E+00	7,31E-04	-1,12E+00
60Hz	1,99E-04	0,00E+00	3,86E-04	-4,00E+00
150Hz	8,44E-05	0,00E+00	2,24E-04	1,89E+02
350Hz	2,28E-05	0,00E+00	2,85E-05	3,10E+02
500Hz	1,51E-05	0,00E+00	1,99E-05	7,20E+00
750Hz	4,44E-05	0,00E+00	2,62E-05	7,75E+00
1000Hz	3,07E-05	0,00E+00	3,29E-05	-5,68E+01
1500Hz	1,90E-05	0,00E+00	1,74E-05	-2,17E+02
2000Hz	2,73E-05	0,00E+00	3,30E-05	-9,92E-01
2,5kHz	1,27E-06	0,00E+00	2,96E-05	-2,01E+02
3kHz	9,55E-06	0,00E+00	1,57E-05	2,35E+02
4kHz	1,12E-05	0,00E+00	1,48E-05	-2,71E+02
5kHz	1,31E-05	0,00E+00	4,01E-06	-1,89E+02
6kHz	1,64E-05	0,00E+00	2,12E-05	4,16E-01

Tabulka č.3 Ukázka výstupu z kalibračního měření

Z celé této tabulky je podstatný pouze řádek uvozený právě jako zmíněná frekvence 50Hz. Z tohoto řádku lze vyčíst, že měřená napětí na výstupu napěťového převodníku bylo

rovno 3V a u proudového 5,01V, což řádově odpovídá převodním konstantám uvedeným v dokumentaci k převodním modulům, které jsou pro napětí 100V/1V a 4A/1V.

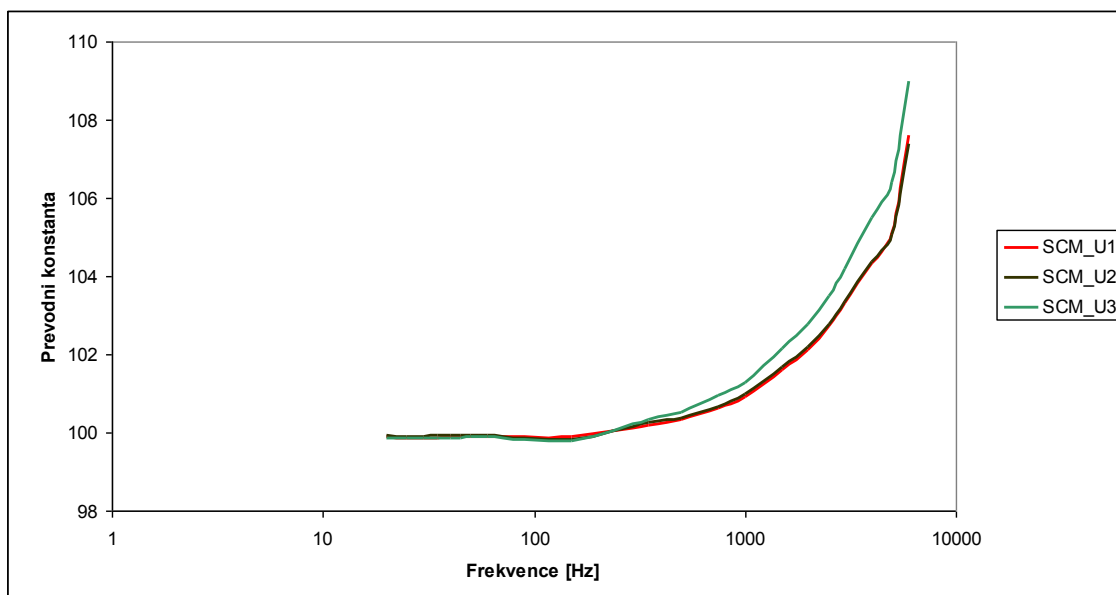
Podstatně zajímavější, jak do obsahu, tak pro další využití je potom tabulka č.4, obsahující výsledné převodní konstanty pro tytéž převodní moduly spočtené z měřených napětí. Součinem těchto hodnot a napětí měřeného na výstupu příslušného převodníku získáme přesné hodnoty napětí/proudu právě před jejich úpravou. Hodnoty fázových symbolizují fázový posun mezi signálem daného převodníku a prvního, referenčního převodníku a jsou uváděny ve stupních.

	Prevodni Konstant U1	Fazovy posun mezi U1 a U1	Prevodni Konstant I1	Fazovy posun mezi U1 a I1
DC	98,53562	0	4,0121536	0
20Hz	99,8823	0,0000	3,9884	0,0253
25Hz	99,8617	0,0000	3,9876	0,0337
30Hz	99,8611	0,0000	3,9879	0,0424
35Hz	99,8709	0,0000	3,9884	0,0517
40Hz	99,8756	0,0000	3,9887	0,0610
45Hz	99,8777	0,0000	3,9890	0,0711
50Hz	99,8872	0,0000	3,9894	0,0797
55Hz	99,8884	0,0000	3,9896	0,0908
60Hz	99,8906	0,0000	3,9899	0,0995
150Hz	99,8756	0,0000	3,9887	0,2879
350Hz	100,1769	0,0000	4,0082	0,6846
500Hz	100,3209	0,0000	4,0189	1,0350
750Hz	100,6327	0,0000	4,0394	1,6534
1000Hz	100,9238	0,0000	4,0557	2,3394
1500Hz	101,6110	0,0000	4,0847	3,7010
2000Hz	102,1224	0,0000	4,0970	5,0334
2,5kHz	102,7126	0,0000	4,1106	6,2836
3kHz	103,2977	0,0000	4,1243	7,4625
4kHz	104,3358	0,0000	4,1480	9,7066
5kHz	105,0860	0,0000	4,1681	11,8252
6kHz	107,5843	0,0000	4,2655	13,8388

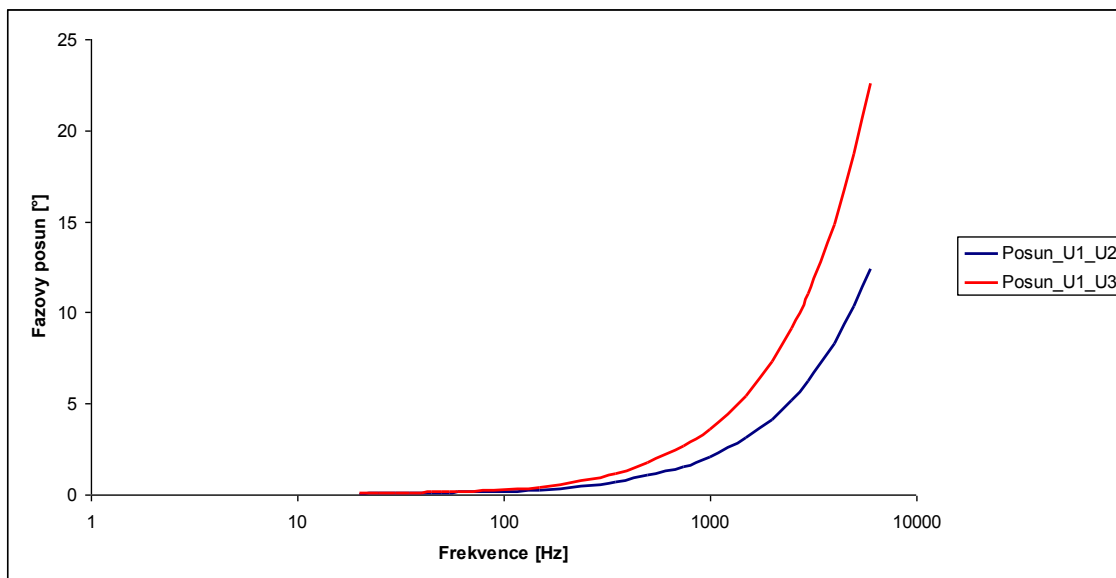
Tabulka č.4 Ukázka tabulky kalibračních konstant

Z tabulky je patrné, že zejména pro vyšší frekvence dochází nezanedbatelné změně převodní konstanty. První sloupec fázového posunu zachycuje posun referenčního modulu a je tudíž z principu pro všechny frekvence roven nule. Druhý sloupec fázového posunu zaznamenává posun mezi prvním napětovým a prvním proudovým modulem. Na základě kalibračního měření lze potvrdit očekávání jeho rostoucího charakteru souvisejícím s rostoucí

frekvencí sledovaného signálu. Tento zvyšující se posun je z velké části způsoben hodnotou interchannel delay, která je vysvětlena již výše v textu, v kapitole 3.3.



Obr.17 Graf závislosti převodní konstanty na frekvenci pro napěťové převodníky



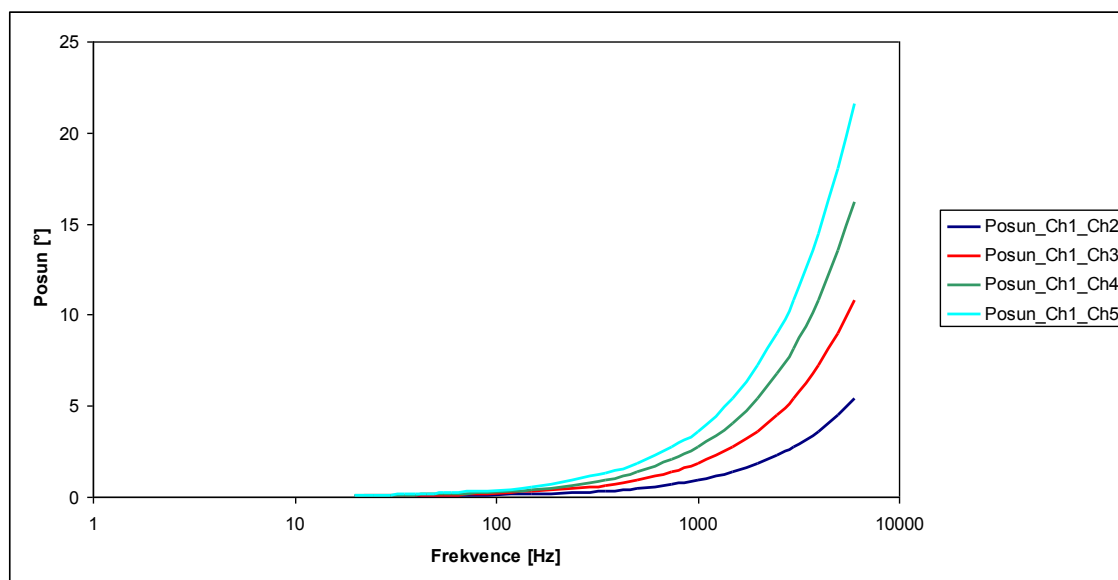
Obr.18 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci pro napěťové převodníky

Předchozí grafy na obrázcích 17 a 18, zachycují frekvenční závislosti prvních třech napěťových převodníků hodnot převodní konstanty a vzájemného fázového posunu. V grafech jsou zobrazovány vlastnosti pouze tří převodníků pro udržení přehlednosti.

Již z prvního pohledu na graf závislosti převodní konstanty, je patrný důvod provádění této kalibrace. Ačkoliv by převodníky měly být teoreticky totožné, je pochopitelné, že absolutní identity nelze dosáhnout a drobné rozdíly se projevují právě v těchto rozdílných charakteristikách.

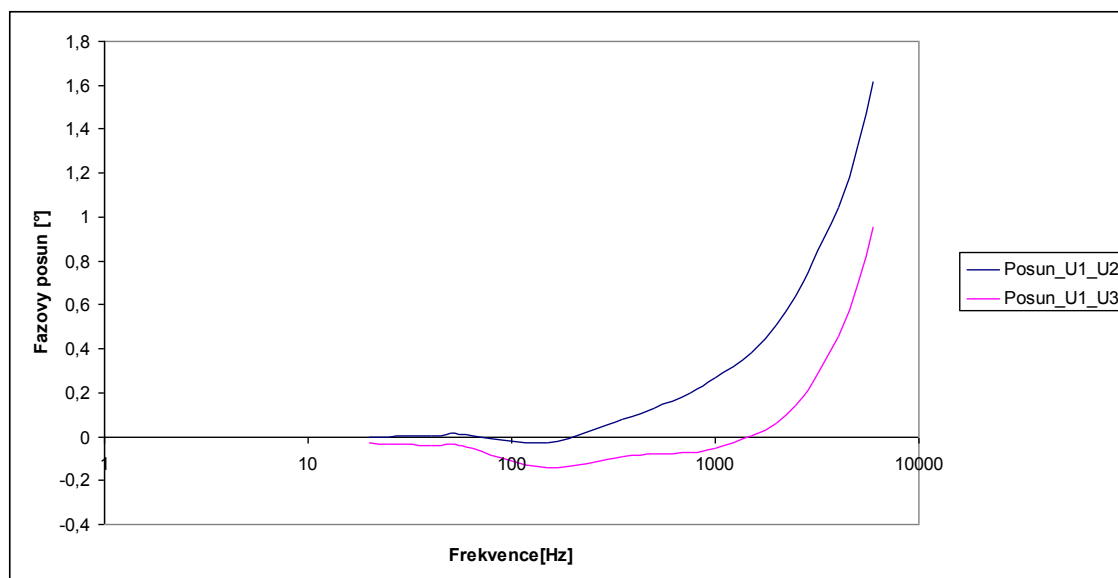
Frekvenčně fázová charakteristika jen potvrzuje, že vliv interchannel delay na fázi roste s frekvencí a roste také v závislosti na počtu přepínaných kanálů.

Pro lepší ilustraci problému, následující graf vykresluje tuto závislost fázového posunu způsobeného pouze přepínáním mezi kanály.



Obr. 19 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci přepnutím kanálu

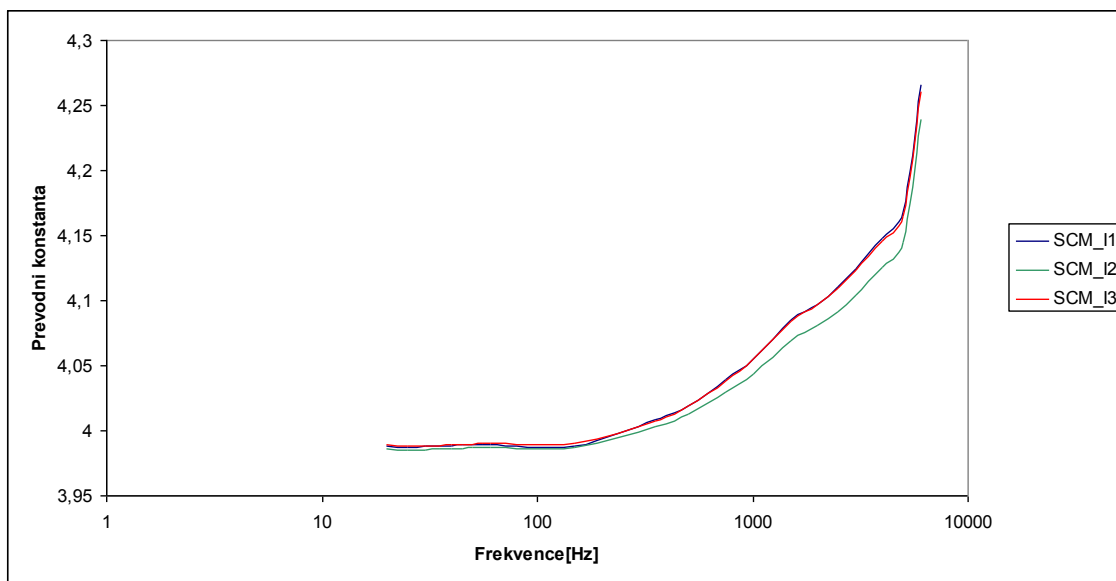
Při znalosti této tvaru této křivky, je možné dopočítat také vzájemný fázový posun způsobený pouze vlastnostmi jednotlivých převodníků.



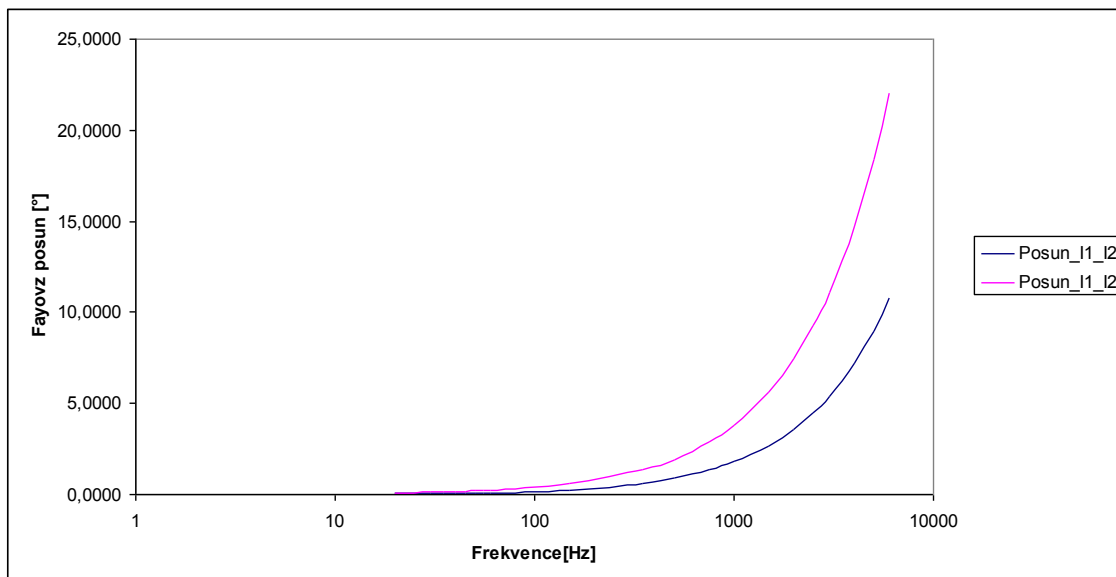
Obr. 20 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci bez vlivu přepnutí kanálu pro napěťové převodníky

Z grafu jasně vyplývá, že použité napěťové převodníky mají velmi podobnou frekvenční fázovou charakteristiku, neboť samy o sobě způsobují minimální vzájemný fázový posun. Konkrétně při frekvencích do 150Hz posun menší než $0,05^\circ$ a při frekvencích do 6kHz je fázový posun nižší než 2° .

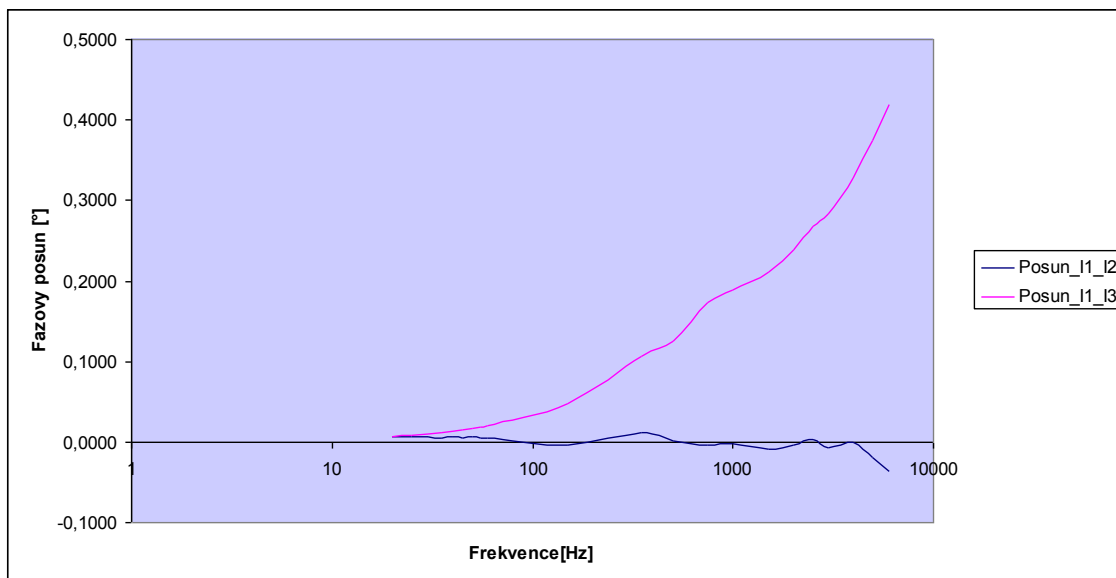
Předchozí grafy vyhodnocovaly vlastnosti napěťových převodních modulů SCM101. Nadcházející grafy obdobně zhodnotí také vlastnosti proudových převodních modulů SCM111.



Obr.21 Graf závislosti převodní konstanty na frekvenci u proudových převodníků



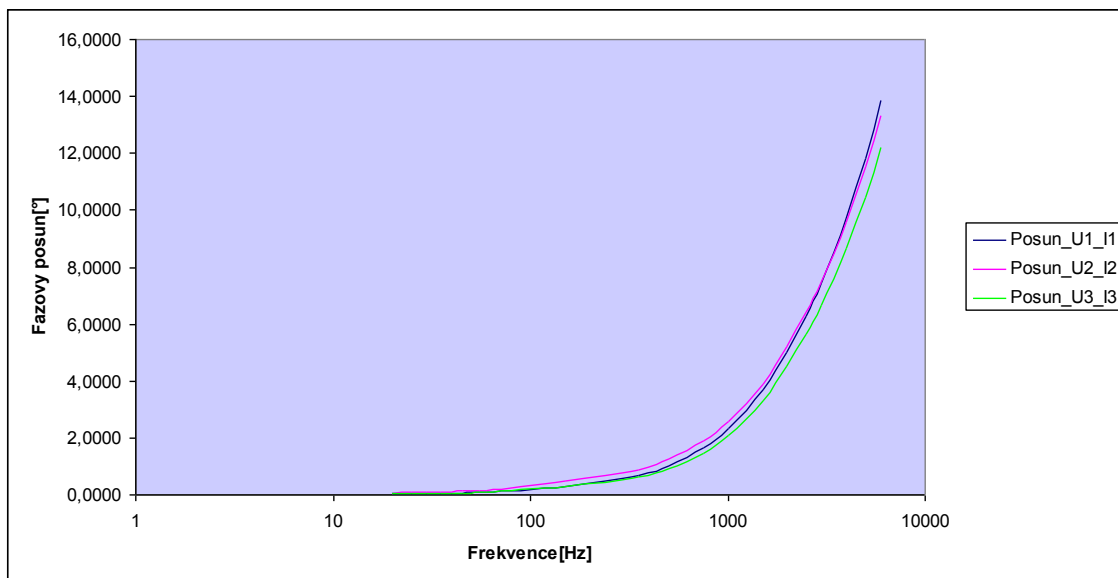
Obr.22 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci u proudových převodníků



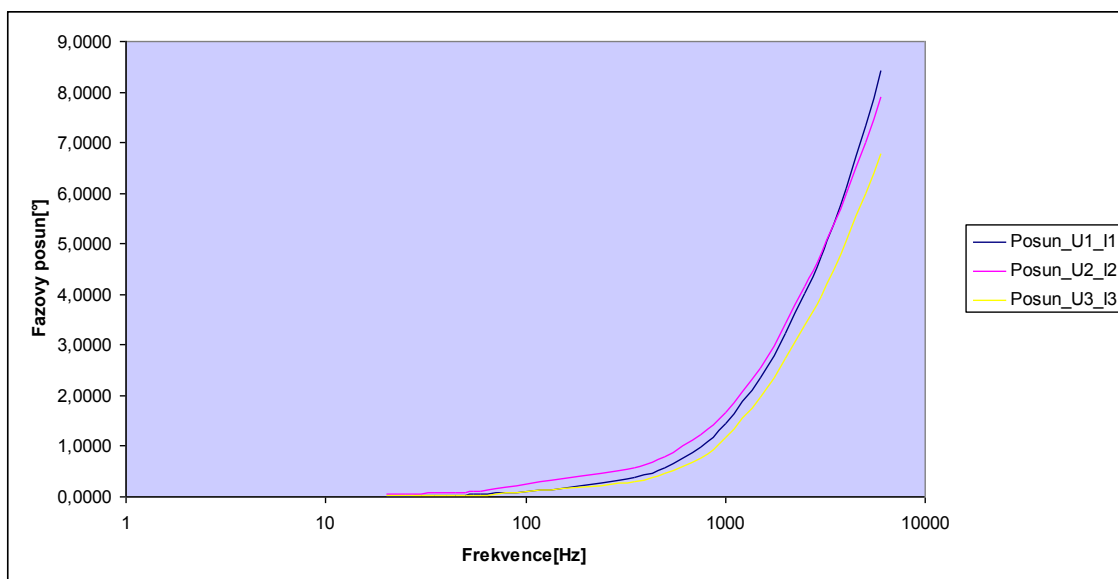
Obr. 23 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci bez vlivu přepnutí kanálu pro proudové převodníky

Z grafů lze vyvodit, že frekvenční charakteristiky převodních konstant mají obdobný charakter jak u proudových, tak u napěťových převodních modulů. V nižších frekvencích se pohybují v blízkosti hodnot udávaných v technické dokumentaci. U frekvencí do 150 Hz odchylka od udávané hodnoty nepřevyšuje deklarované 2,5%, avšak se zvyšující se frekvencí má odchylka rostoucí charakter. U frekvence 6 kHz už ale odchylka dosahuje téměř 8% jak u proudových tak u napěťových modulů.

Dále se z předchozích charakteristik dá říci, že proudové převodníky mají podobnější fázové charakteristiky, neboť jejich rozdíl nepřesahuje ani $0,5^\circ$, na rozdíl od napěťových, jejichž rozdíly fázových charakteristik se blíží ke 2° . Toto srovnání je ovšem pouze důkazem rozdílnosti jednotlivých převodníků, stejného typu a tudíž také opodstatněním pro jejich kalibraci.



Obr.24 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci mezi páry napěťových a proudových převodníků



Obr.25 Graf závislosti fázového posunu na frekvenci mezi páry napěťových a proudových převodníků, bez vlivu přepnutí kanálu

Pro následné měření jsou podstatné hlavně fázové posuny mezi jednotlivými páry napěťového a proudového. Na předchozích grafech jsou právě tyto závislosti fázového posunu na frekvenci pro jednotlivé páry převodních modulů. Pro jejich charakteristiku jako takovou je podstatný především fázový posun po odečtení vlivu prodlevy při přepnutí jednotlivých kanálů měřicí karty, avšak s tímto vlivem je potřeba počítat opět při následném využití těchto kalibračních hodnot. Z tohoto důvodu a vzhledem k předpokladu využití shodných měřicích karet jsou kalibrační data uložena včetně vlivu této prodlevy. V případě záměny měřicích karet za jiný typ, zejména pokud by nové karty měly jinou hodnotu interchannel delay, respektive maximální vzorkovací frekvence, by ovšem bylo potřeba přepočítat kalibrační hodnoty fázového posunu vzhledem ke změně tohoto jejího ovlivnění.

Z předchozí analýzy výsledků vyplývá, že smysl kalibrace by se nejvíce projevil při měření vysokofrekvenčních signálů. Pro rychlé ověření úspěšnosti kalibrace byla provedena série malého počtu kontrolních měření na signálu o frekvenci 50Hz výskytem vyšších harmonických, jejíž výsledky jsou zaznamenány v následující tabulce.

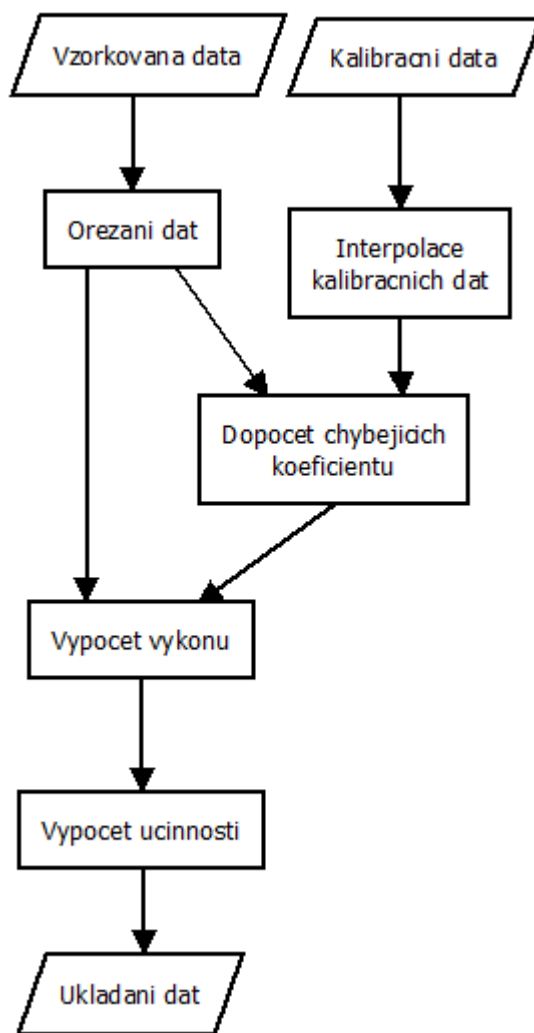
Generovaný Výkon	Kalibrované měření	odchylka Kalibrovaného	Neakalibrované měření	odchylka Nekalibrovaného
30	30,047863	-0,160	30,159492	-0,532
300	299,762518	0,079	301,365459	-0,455
3000	2998,458785	0,051	3009,4999	-0,317
6000	5999,979661	0,000	6022,110997	-0,369
4150	4142,716433	0,176	4159,691614	-0,234
3850	3847,33926	0,069	3862,315037	-0,320
3775	3774,595464	0,011	3788,239187	-0,351

Tabulka č.4 Ukázka kontrolních měření

Z tabulky je patrné že odchylka měřených výkonů bez využití kalibrace při každém měření vyšší než odchylka pro kalibrované měření. Odchylka při měření výkonu při využití kalibrace se drží po hodnotou 0,2%, zatímco nekalibrované měření přesahuje odchylku 0,5%.

4.2 Software měřícího systému

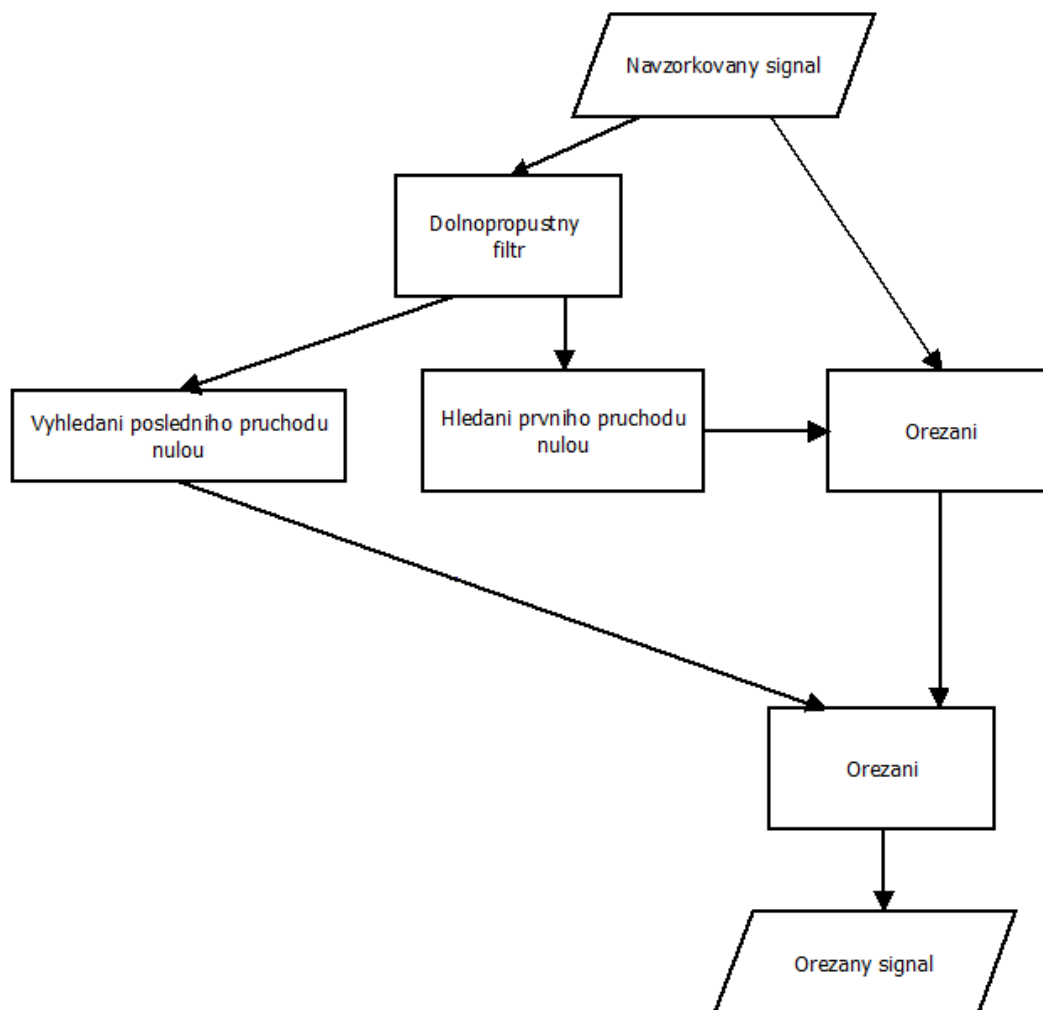
Pro účelné použití hardwaru, je potřebné vyvinout příslušný software. Na základě analýzy řešeného problému vykryštovalo následující zjednodušené schéma, viz obr.26. Toto schéma vyobrazuje jeden běh programu. Pro souvislé měření je tedy potřeba jeho periodické spouštění. Podstata jednotlivých bloků tohoto schématu je podrobně vysvětlena v následujících podkapitolách.



Obr.26 Blokové schéma měření účinnosti

4.2.1 Ořezání vzorkovaného signálu na celé periody

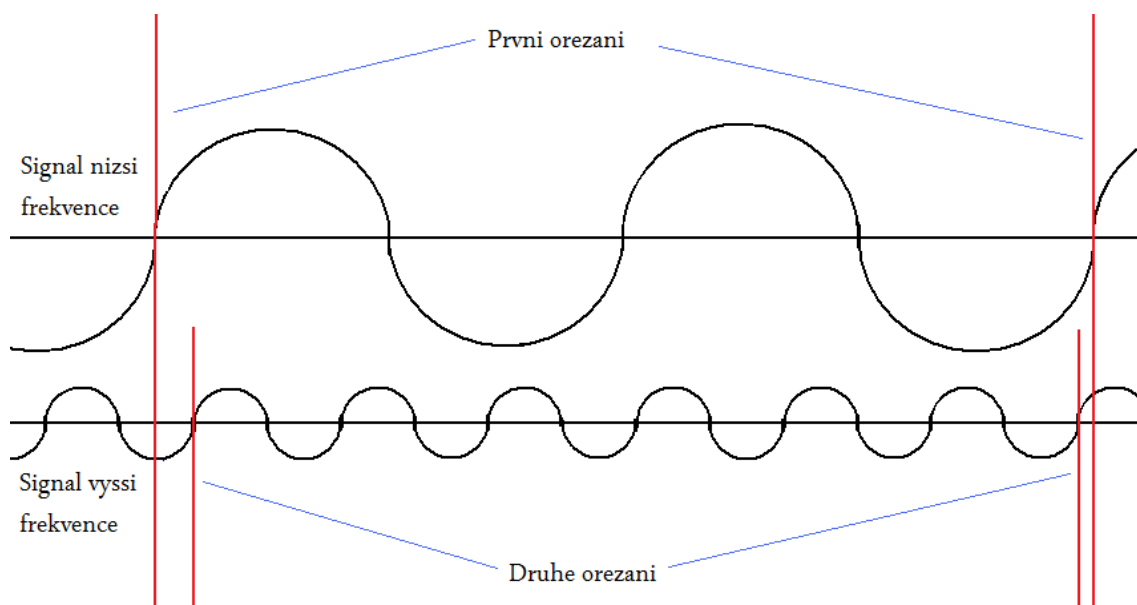
Ořezání měřeného signálu na celistvé periody probíhá v programu pro měření účinnosti obdobně jako v programu použitém pro kalibraci. Rozdíl tkví v neznalosti počtu hledaných celých period a jsou vybírány všechny, které se v daném měření vyskytují. Jelikož měření účinnosti, na rozdíl od kalibrace, bude po většinu času probíhat bez přítomnosti obsluhy, musí být ošetřeno proti zacyklení ve chvíli kdy se ve vzorkovaném signálu nenachází žádný průchod nulou.



Obr.27 Blokové schéma ořezání signálu

4.2.2 Měření signálů o dvou různých frekvencích v jednom časovém okně

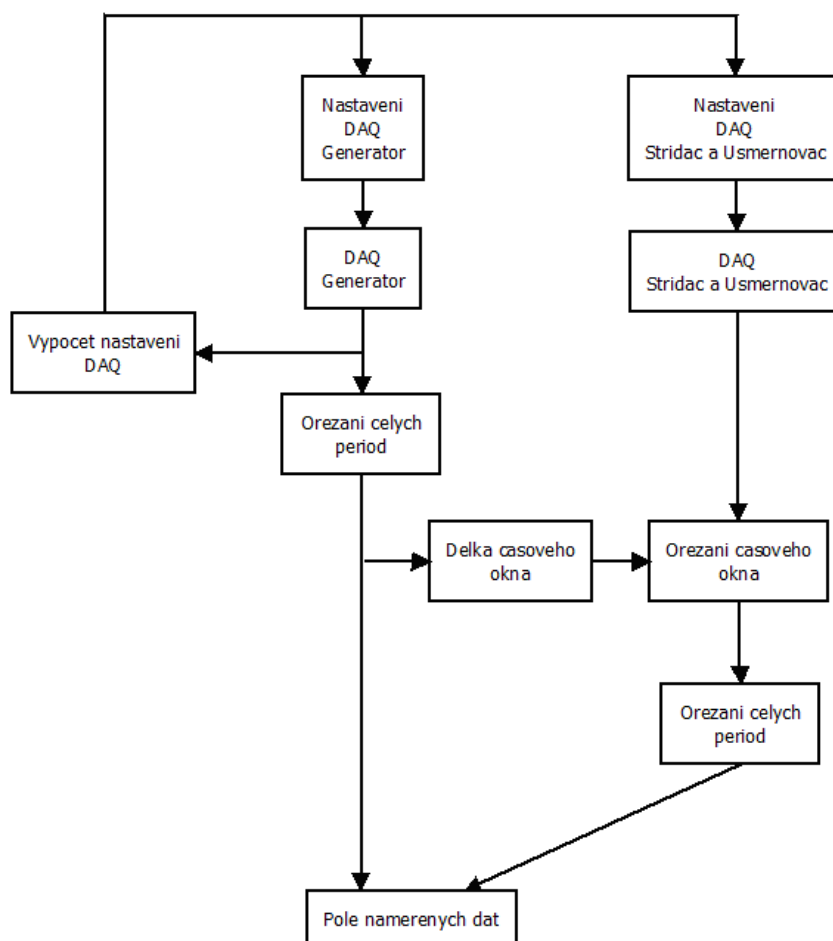
Vzhledem k faktu, že amplitudy signálů jsou proměnlivé v čase, je zásadní provádět vždy všechna měření ve shodném časovém okně. Při měření periodických signálů, o dvou různých frekvencích, je pro jejich následnou analýzu rovněž potřeba pracovat pouze s násobky jejich celých period. Z tohoto vyplývá, že nelze absolutně naplnit snahu o udržení jednoho časového okna pro oba tyto signály. Takový stav by nastal pouze za zvláštních podmínek, kdy časové okno měření je beze zbytku dělitelné periodami obou signálů. Takováto chvíle ovšem, v reálných podmínkách provozu sledované větrné elektrárny, téměř nenastane a nelze na ni tudíž spoléhat. Při měření je tedy nutné upustit od pokusů o dosažení ideálního stavu, kdy jsou časová okna zcela shodná, a přejít ke snaze se k tomuto co nejvíce přiblížit. Při ořezání časového okna dochází k pochopitelným ztrátám dat. V extrémním případě, může kmitočet signálu o nižší frekvenci klesat k hodnotě 2Hz. Druhý měřený signál má stálý kmitočet 50Hz. Vzhledem k použité metodice ořezání signálu na násobky celistvých period, dochází vždy při této operaci ke ztrátě dat. V extrémních případech může dojít k odříznutí dvou, téměř celých period a tudíž ke zkrácení časového okna o 1s v prvním případě a o 0,04s v případě druhém. Pro dosažení co nejmenšího rozdílu vyhodnocovaných časových oken, je tedy nejvýhodnější nejprve shodně oříznout obě časové okna v závislosti na detekování celistvých period signálu nižšího kmitočtu a následně vyhledat celé periody signálu s vyšší frekvencí a ořezat jej. Tímto způsobem dojde k maximálnímu teoretickému rozdílu časových oken právě 0,04s. Způsob takového postupného ořezání je graficky znázorněn na obrázku číslo 28 a následně také na blokovém schématu na obrázku 29.



Obr.28 Znázornění způsobu ořezání dvou signálů různých frekvencí

4.2.3 Měření signálu s proměnnou frekvencí

Každé měření určuje nastavení parametrů vzorkovací frekvence a délky měření, respektive, počtu měřených vzorků. Věrnost vzorkovaného signálu vzhledem k původnímu je přímo odvislá od počtu vzorků připadajících na jednu periodu. Kvalita měřeného signálu je odvislá od počtu měřených period signálu. V případě nastavení konstantních parametrů, by bylo potřeba brát v potaz maximální frekvenci sledovaného signálu pro určení minimální vzorkovací frekvence a jeho minimální frekvenci pro nastavení časového okna měření. Takto zvolené parametry měření by způsobovaly zbytečně dlouhé časové okno, ve chvíli kdy signál dosahuje své nejvyšší frekvence. Při nejnižším kmitočtu signálu by potom docházelo k nadbytečně častému vzorkování. Neopodstatněně navýšený počet měřených vzorků by při následných výpočtech, zejména potom fourierových transformací, zbytečně zatížil výpočetní možnosti počítače. Při delším časovém okně také pravděpodobněji dojde k výraznějším amplitudovým a frekvenčním změnám měřeného signálu, vycházejícím z podstaty fungování, větrné elektrárny.



Obr.29 Blokové schéma způsobu ořezání dvou signálů různých frekvencí a nastavení časového okna následného měření

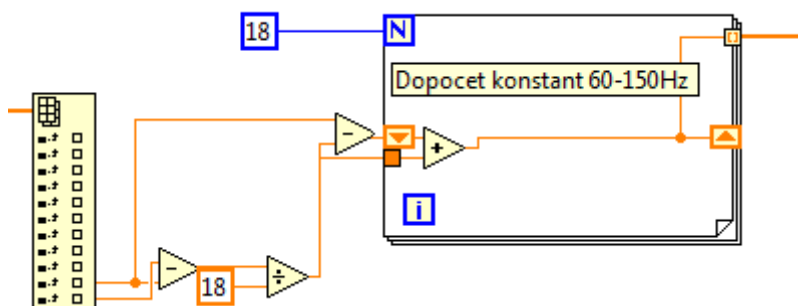
Schéma na obrázku 29 znázorňuje realizaci zpětnovazebního nastavení parametrů měření včetně metody ořezání dvou signálů o různých frekvencích popsané v bodu 4.2.2.

4.2.4 Interpolace kalibračních dat

Pole dat získaných při kalibraci jsou v podstatě prvky amplitudového, potažmo fázového spektra, které mají mezi sebou různý frekvenční krok. Pro aplikaci na měřená data je nutné tento krok sjednotit, neboli dopočítat chybějící hodnoty mezi stávajícími prvky. Pro tyto potřeby je využit systém lineární interpolace.

Na obrázku č. 30 je ukázka kódu pro interpolaci kalibračních konstant pro frekvence ležící mezi známými prvky od 60Hz po 150Hz, respektive posledním prvkem je konstanta příslušící frekvenci 145Hz. Vstupem této části kódu je pole dvaadvaceti prvků získaných při kalibraci. Z nich jsou vyindexovány prvky připadající právě na frekvence 60Hz a 150Hz. Dále je vypočten lineární krok pro změnu o 5Hz, který je postupně přičítán k prvku frekvence 60Hz až po dosažení posledního, osmnáctého prvku odpovídajícímu frekvenci 145Hz. Výstupem je tedy pole osmnácti hodnot kalibračních konstant, náležících frekvencím od 60Hz do 150Hz při konstantním kroku 5Hz.

Takovouto interpolací všech mezer frekvenčního spektra je získána plynulá frekvenční charakteristika, dále použitelná pro potřebné výpočty.

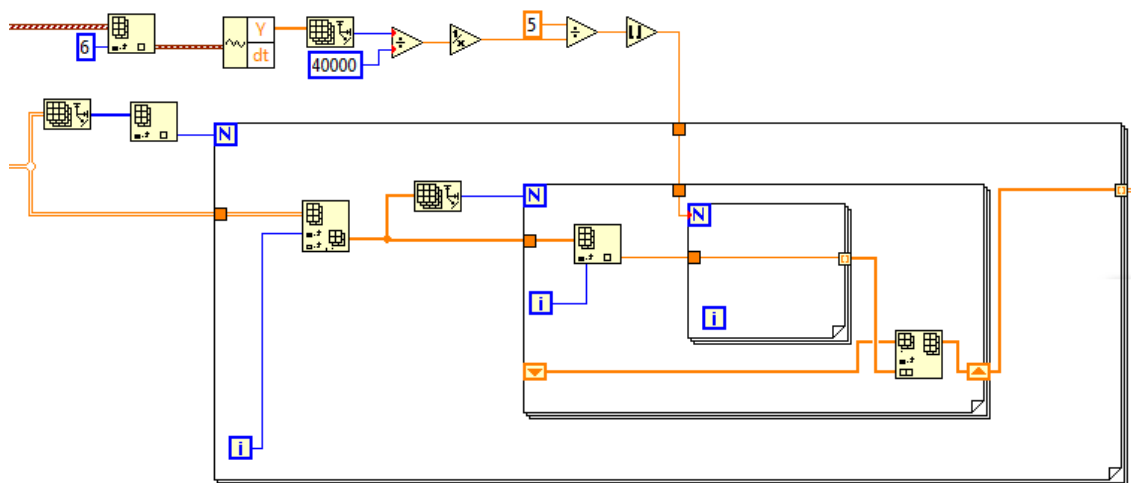


Obr.30 Ukázka kódu lineární interpolace kalibračních dat

4.2.5 Doplnění kalibračních dat pro aktuální frekvenční krok

Lineární interpolací kalibračních konstant, byly získány hodnoty s krokem 5Hz. Pro korektní výpočty výkonů ve frekvenční oblasti s využitím Parsevalova teorému, by takto získané konstanty posloužily pouze ve chvíli, kdy je analyzované časové okno $T_w = 0,2s$, které vzhledem k charakteru a předpokládanému nastavení, nikdy nenastane. Pro všechny ostatní případy je nutné dopočítat hodnoty pro frekvenční krok příslušný aktuálnímu časovému oknu. Vzhledem k průběhu frekvenčních charakteristik, nemá příliš smyslu pro tento dopočet používat interpolace a postačí mezi jednotlivými kroky držet konstantní hodnoty.

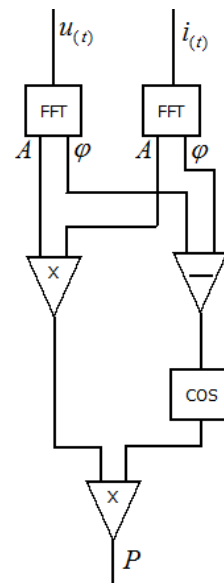
Realizace této operace je zachycena na úseku programového kódu na obrázku 31. Do tohoto bloku vstupují, interpolované kalibrační konstanty a měřená data, pro zjištění délky časového okna, která odvozena od počtu prvků, při znalosti vzorkovací frekvence. Poté je spočten počet chybějících kalibračních konstant mezi těmi, které jsou již známy. Výstup této části je tede pole, s proměnnou délkou v závislosti na délce aktuálního časového okna.



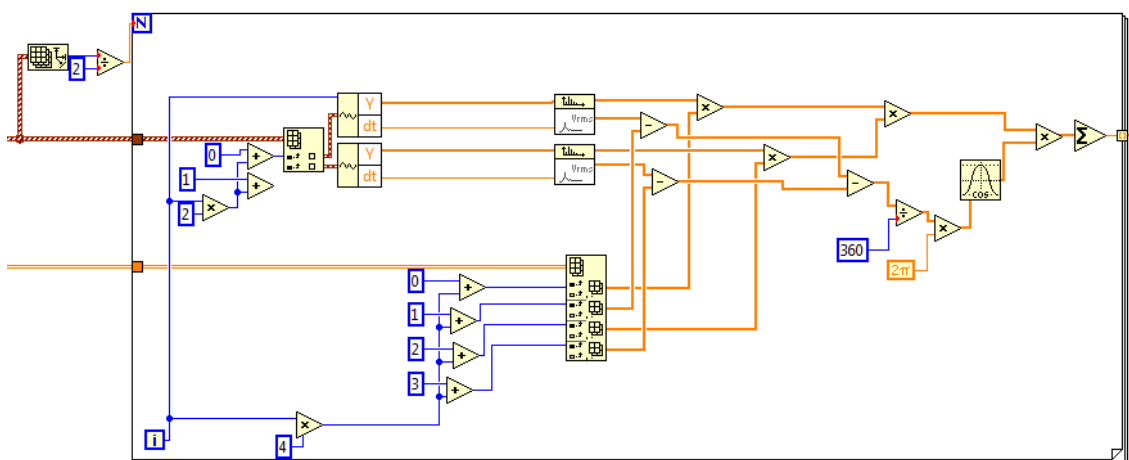
Obr.34 Ukázka kódu aplikace kalibračních konstant a výpočtu výkonu ve frekvenční

4.2.6 Výpočet výkonu ve frekvenční oblasti a aplikace kalibračních konstant

Pro výpočet výkonu je využito Parsevalova teorému, jenž umožňuje vyčíslit výkon z frekvenčních amplitudových a fázových spekter. Výhoda tohoto způsobu tkví ve snadné aplikovatelnosti, dříve odměřených, frekvenčně závislých kalibračních konstant. Na obrázku 32 je blokové schéma výpočtu výkonu frekvenčních spekter. Praktická realizace tohoto výpočtu je následně zachycena na obrázku číslo 33, včetně aplikace kalibračních konstant. Do této části kódu vstupují pole obsahující všechna měření a pole obsahující kalibrační konstanty upravené pro dané měření. Daný blok probíhá vždy pro jeden pár napětí a proudu. Tyto jsou vybrány z pole všech měření. Následuje jejich převod do frekvenčního spektra a aplikace správných kalibračních konstant. Výsledný výkon je sumou výkonů všech zastoupených frekvenčních složek. Výstupem tohoto bloku je tedy obecně pole vypočtených výkonů, které by pro danou aplikaci mělo čítat právě sedm prvků.



Obr.32 Výpočet výkonu ve frekvenční oblasti

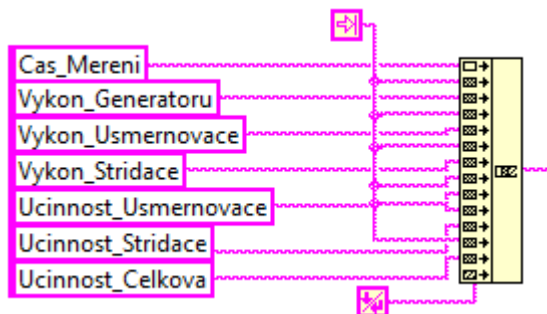


Obr.34 Ukázka kódu aplikace kalibračních konstant a výpočtu výkonu ve frekvenční oblasti

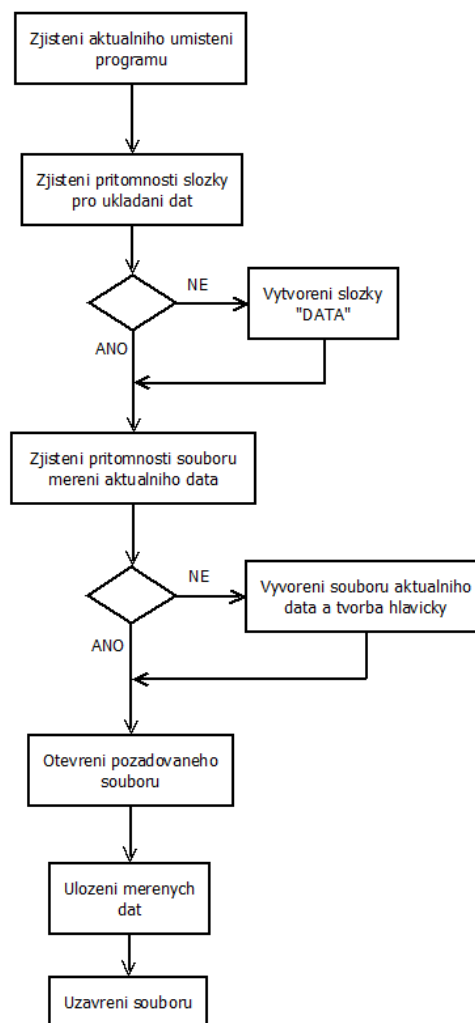
4.2.7 Ukládání měřených dat do souboru

Jak již bylo zmíněno výše, pro ukládání dat byl zvolen pro svou jednoduchost a přístupnost, standardní formát .txt. Vzhledem k četnosti měření, je vhodné neukládat zvlášť každé jednotlivé měření, ale vždy po určitých sériích aby nedocházelo k neustálému zapisování dat na disk.

Blok programu zajišťující ukládání měřených dat, je nastaven k ukládání souborů do složky „Data“ umístěné ve složce s vlastním programem. Soubory jsou členěny podle data měření v nich obsažených. Každé měření obsahuje informaci o čase svého pořízení. Jak patrné z blokového schématu na obr. 36, nejprve je kontrolována přítomnost složky pro ukládání dat a v případě její nepřítomnosti je vytvořena. Obdobně je kontrolována přítomnost souboru aktuálního data a případně je vytvořen nový, včetně hlavičky. Tvorba hlavičky je zobrazena na obrázku 35.



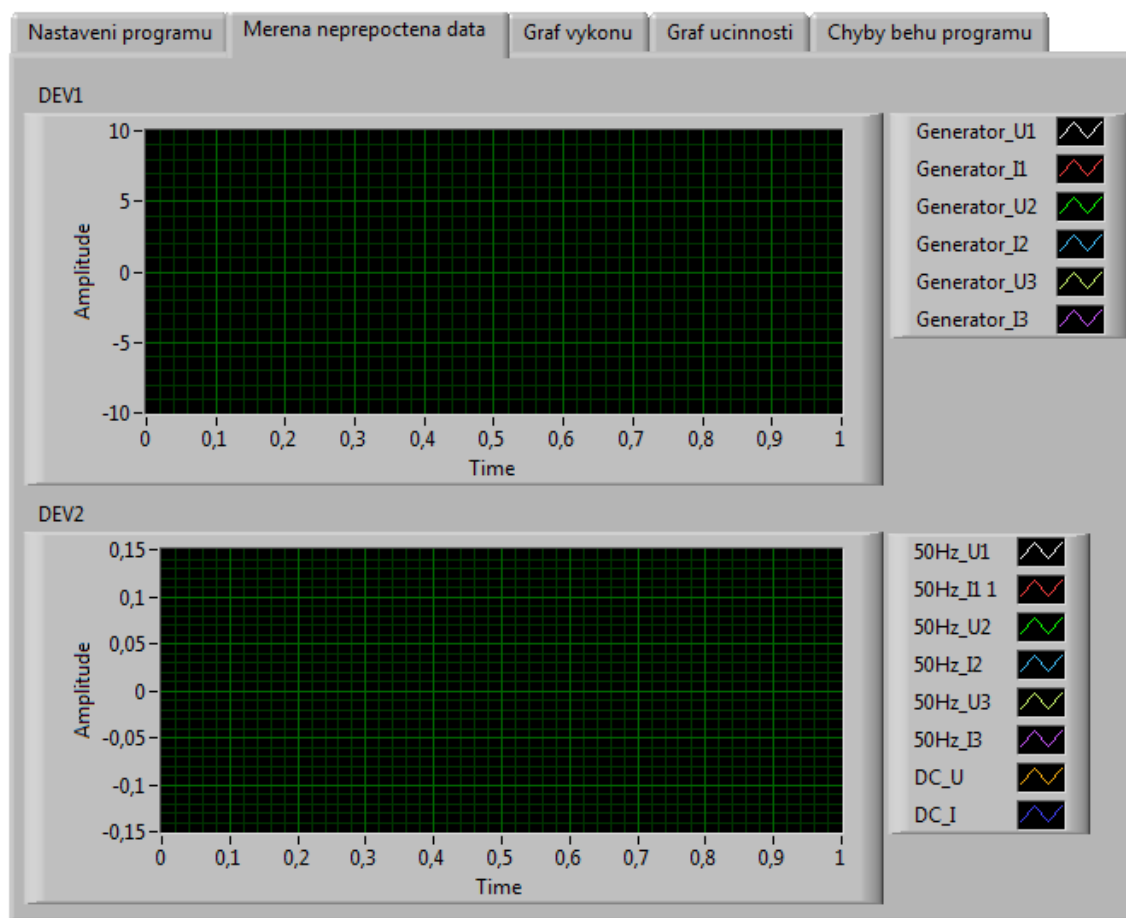
Obr.35 Tvorba hlavičky souboru



Obr.36 Schéma ukládání dat do souboru

4.2.8 Grafické uživatelské rozhraní

Vzhledem k faktu, že se jedná o program pro kompletně automatizovaný, dlouhodobý sběr dat, neočekává se příliš častá interakce ze strany uživatele. Rozhraní tudíž ani nenabízí příliš možností, pro jakékoliv ovládání programu v průběhu vlastního sběru dat, ale spíše indikátory správného fungování v podobě indikátorů aktuálně měřených hodnot a grafů zobrazujících jejich průběh v čase. Uživatelské rozhraní jako takové je intuitivní a snadné na obsluhu.

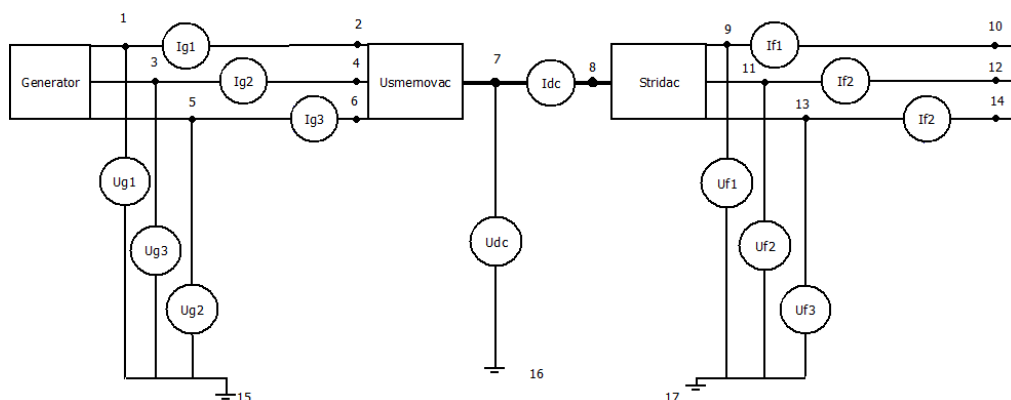


Obr.37 Ukázka záložky grafického uživatelského rozhraní

5 Zapojení měřícího systému

Kompletní měřící systém se skládá ze 14 SCM modulů, 7 proudových a 7 napěťových. Dále je pro jeho funkci potřeba napěťový zdroj 24V, 2 měřící karty a běžné PC pro provoz měřící aplikace.

Celý systém navržen pro umístění do laboratoře Katedry elektroenergetiky L04. Vzhledem k poměrně vysokým napětím, které je potřeba přivést na vstupy převodníků, musí být tyto převodníky umístěny v rozvaděči. Z důvodu nedostatku místa ve stávajících rozvaděcích určených pro větrnou elektrárnu, bylo nutné zakoupit nový, zvláště pro tuto aplikaci. Napájení všech modulů pro převod signálů je paralelně propojeno se zdrojem napětí. Výstupy převodníků jsou vyvedeny na svorkovnice měřících karet. Jednotlivé vstupy převodníků jsou vyvedeny na svorky dle následujícího schématu zapojení. Svorky jsou řazeny vedle sebe dle číslování vzestupně.



Obr.38 Schéma propojení převodníků

Fotka na obrázku 39 zachycuje rozvaděč s propojenými převodníky, zavěšený na zdi v laboratoři L04, stále nepřipojenými k elektrárně. Bohužel i přes dostatek času, nedošlo ze strany pracovníků Katedry elektroenergetiky k finálnímu připojení převodníků k větrné elektrárně a tudíž je tato fotka stále zobrazením aktuálního stavu. Z tohoto důvodu nebylo možné ověřit funkčnost vytvořeného měřícího systému v praxi a jeho vývoj tedy prozatím skončil pouze ve fázi laboratorního testování.



Obr.39 Rozvaděč s převodníky

6 Závěr

Tato práce shrnuje teoretickou problematiku funkce větrných elektráren z pohledu snahy o měření jejich účinnosti, respektive účinnosti jejich jednotlivých funkčních bloků. Konkrétně potom měření účinnosti na větrné elektrárně vyskytující v areálu Vysoké školy báňské – Technické univerzity v Ostravě – Porubě a je pod správou Katedry elektroenergetiky. Na základě podkladů poskytnutých byla vyspecifikována hardwarová část měřicího systému. Kompletní hardware byl zkalibrován, a byla ověřena jeho přesnost. Chyba měření výkonů po kalibraci nepřesahuje nepřevyšuje hodnotu 0,2%. Veškerá data získaná při kalibraci jsou, vzhledem ke svému rozsahu, součástí elektronických příloh. Na základě předpokladů vyvozených z analýzy funkce větrné elektrárny, byl vyvinut software pro využití pro pořízené hardwarové části k měření účinnosti této elektrárny. Při vývoji bylo dbáno na požadavek dlouhodobého sběru dat, bez nutnosti zásahu obsluhy.

Bohužel i přes dostatek času, nedošlo ze strany pracovníků Katedry elektroenergetiky k finálnímu připojení převodníků k větrné elektrárně. Nebylo tudíž možné otestovat měřicí vyvinutý systém jinak, než na laboratorním generátoru, při kterém nešlo věrně nasimulovat provoz větrné elektrárny pro kterou je systém určen. Je rovněž možné, že se při reálném zapojení vyskytnou nečekané vlivy narušující chod programu. Takovými vlivy je myšlen například pravděpodobný výskyt rušení, které může narušit komunikaci měřících karet po sběrnici USB. Pokud by se takový problém opravdu vyskytl a neodstranilo by jej například použití feritové perly, podstata virtuální instrumentace umožňuje snadnou záměnu používaných USB karet za karty s rozhraním PCI. Bez testování systému přímo na elektrárně, nebylo možné ověřit charakter přechodových dějů při poměrně častém vypínání a zapínání elektrárny a následnou reakci měřicího systému.

Dále nebyly ze strany Katedry elektroenergetiky, krom kusých informací o jejich existenci a hypotetické podobě, poskytnuty relevantní informace o charakteru, ani umístění výstupu čidel snímajících točivý moment a otáčky rotoru elektrárny. Z tohoto důvodu, prozatím konečná verze programu pro vyhodnocení účinnosti, neobsahuje část pro měřicí mechanický výkon pohánějící generátor elektrárny a je tudíž ochuzena o sledování účinnosti samotného generátoru

Pro případné budoucí naplnění smyslu této bude potřeba zapojit měřicí systém k větrné elektrárně a důkladně otestovat jeho funkčnost a odladit možné chyby v programu, které bez tohoto testování nebyly odhaleny. Bez větších obtíží, je v případě zisku potřebných podkladů, rovněž možné doplnit měřicí software o vyhodnocení výše zmiňovaného mechanického výkonu, neboť s ním bylo při specifikaci hardware počítáno.

Pokud ovšem v budoucnu nebude tento konkrétní měřicí systém zapojen do provozu, je možné využít výhod virtuální instrumentace a jednotlivé komponenty využít pro jiné, libovolné měření.

7 Použitá literatura

- [1] LabVIEW Fundamentals.[/i] National Instruments, Austin, 2007. 165s.
- [2] Firemní dokumentace NI Developer Zone.
- [3] LINDOVSKÝ, Jan. *SPOLEHLIVOST VĚTRNÝCH ELEKTRÁREN V ELEKTRIZAČNÍ SOUSTAVĚ*. Ostrava, 2010. 85 s. Disertační práce. VŠB-TU Ostrava.
- [4] HRADÍLEK, Zdeněk; LINDOVSKÝ, Jan. Integrace větrných elektráren do elektrizační soustavy. *Elektroenergetika Journal*. 2009,
- [5] NEVŘIVA, Pavel. Analýza signálů a soustav. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2000. 672 s
- [6] Havlíček, Josef; Vlach, Jaroslav; Vlach, Martin; Vlachová, Viktorie. *Začínáme s LabView*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2008. 247s
- [7] Brník, Bohumil. *Elektrická měření pro bakaláře*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2011.
- [8] Hájek, Karel, Sedláček, Jiří. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2002. 535s

8 Internetové odkazy

- | | |
|---|----------------------|
| [9] www.ni.com | National instruments |
| [10] www.elcom.cz | Elcom a.s. |
| [11] www.fluke.com | Fluke |
| [12] www.yokogawa.cz | Yokogawa |
| [13] www.lem.com | Lem |

9 Seznam příloh

Příloha I – Program pro kalibraci (na přiloženém CD)

Příloha II - Program pro vlastní měření účinnosti (na přiloženém CD)

Příloha III – Dokumentace provedené kalibrace (na přiloženém CD)

Příloha IV - Technická specifikace použitých převodníků (na přiloženém CD)

Příloha V - Technická dokumentace použitých měřících karet (na přiloženém CD)

Příloha VI - Rozšířený abstrakt v anglickém jazyku (na přiloženém CD)